# Die Prinzipien der Atomdynamik

von

J. Stark

I.

Die elektrischen Quanten



# Prinzipien

der

# Atomdynamik

Von

**Dr. J. Stark**

Professor der Physik an der Technischen Hochschule Aachen

I. Teil

## Die elektrischen Quanten

Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1910

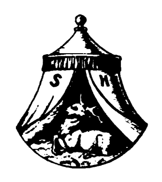
Die

# elektrischen Quanten

Von

**Dr. J. Stark**

**Professor der Physik an der Technischen Hochschule Aachen**




Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1910

# Vorwort.

In dem vorliegenden ersten Teil eines Buches über die Prinzipien der Atomdynamik wird zunächst der Begriff des physikalischen Individuums im Zusammenhalt mit dem Begriff des Mediums entwickelt und auf die Notwendigkeit hingewiesen, auf die Erforschung der Eigenschaften der Atome eine andere Denkweise als diejenige der Mediumdynamik anzuwenden. Dann werden die allgemeinen bereits erforschten oder erst zu erforschenden Eigenschaften der elektrischen Quanten dargestellt, nämlich Ladung, Masse, Volumen, raumzeitliche Struktur; im Zusammenhang damit wird bereits kurz das Verhältnis der elektrischen Quanten zu den chemischen Atomen behandelt. Auf Grund des Nachweises der atomistischen Struktur der Elektrizität wird die atomistische Struktur des leitenden, dielektrischen und magnetischen Mediums analysiert und die Folgerung gezogen, daß auch die Energie in dem Außen- und Innenvolumen eines Körpers für einen elementaren Beobachter eine diskontinuierliche Struktur besitzt.

Der zweite Teil der Prinzipien der Atomdynamik behandelt die elementare Strahlung, nämlich den elementaren Prozeß der Emission und der Absorption von Lichtenergie durch das elementare elektromagnetische Feld einzelner elektrischer Quanten, ferner die Struktur der Strahlung von Seite eines Aggregates von Quanten.

Der dritte Teil hat die Elektrizität im chemischen Atom zum Gegenstand, also den Aufbau der chemischen Atome

aus positiven und negativen elektrischen Quanten, die Struktur der elektromagnetischen Felder an der Oberfläche der chemischen Atome und ihre wechselseitigen Kräfte im Molekül und im Aggregatzustand.

Der zweite Teil der Prinzipien der Atomdynamik richtet sich in erster Linie an den Physiker, der dritte Teil in erster Linie an den Chemiker; beiden Teilen dient als Grundlage der erste Teil.

Der Grundbegriff der Atomdynamik, derjenige des Individuums oder des Atoms, ist mehr oder weniger bewußt bereits lange gebildet oder angewendet worden, auch sind bereits zahlreiche Erscheinungen bekannt, in denen elementare Qualitäten einzelner physikalischer oder chemischer Atome zum unmittelbaren Ausdruck kommen. Indes hat ein großer Teil der naturwissenschaftlichen Forscher bis in die letzte Zeit den Begriff des Atoms für hypothetisch erklärt und die mehr oder weniger zufällig bekannt gewordenen elementaren Erscheinungen an Atomen wurden nur nebenbei zwischen Lehren von den Eigenschaften der Aggregate und Medien behandelt. Nachdem für die elektrische Ladung der experimentelle Nachweis der atomistischen Struktur geführt ist, können auf einer sicheren experimentellen Basis die Prinzipien der Atomdynamik zum ersten Male systematisch in einer besonderen Schrift dargestellt werden.

Eine solche Schrift ist aus folgenden Gründen notwendig. Die systematische Darstellung zeigt, daß kaum die Anfänge der Atomdynamik vorhanden oder daß zwischen bereits beobachteten elementaren Prozessen noch nicht die Zusammenhänge erkannt sind. Indem sie diese Mängel aufdeckt, hat sie der experimentellen Forschung neue Probleme zu stellen und in der richtigen Würdigung bereits beobachteter Erscheinungen sachgemäße prinzipielle Gesichtspunkte für ihre Lösung zu geben. Insbesondere hat eine erste systematische Schrift, den Übergang zu einer den neuen Problemen angepaßten Denkweise zu vermitteln und auf die Grenzen der Anwendbarkeit der bis jetzt überwiegend geübten physikalischen Denkweise aufmerksam zu machen.

Wie notwendig diese letzte Aufgabe ist, hat der bisherige

Verlauf der Diskussion über das Problem der elementaren Strahlung gezeigt. Im Anschluß an die Einsteinsche Interpretation der Grundlage des Planckschen Strahlungsgesetzes habe ich wiederholt Bedenken gegen die Übertragung von Qualitäten eines Aggregates oder eines Mediums auf den elementaren Prozeß der Strahlung geltend gemacht, die Notwendigkeit betont und mich bemüht, aus neuen Erfahrungen Aufschluß über die elementare Strahlung zu gewinnen und das Plancksche Elementargesetz experimentell zu prüfen. Nun ist dem Vorgehen Einsteins und meinen Überlegungen von verschiedenen Seiten der Vorwurf gemacht worden, sie widersprächen den Maxwellschen Gleichungen und bedeuteten ein Aufgeben der großartigen Errungenschaften der Mediumdynamik. Dieser Vorwurf ist indes irrtümlich und hat seinen Ursprung in der Nichtbeachtung der neuen Art des Problems und in einer Verkennung der Voraussetzungen, für welche die Maxwellschen Gleichungen giltig sind. Deren Inhalt ist an Erfahrungen über Aggregate und Medien gewonnen worden, sie haben darum ein raumzeitlich kontinuierliches Medium zur Voraussetzung. Gerade diese Voraussetzung ist aber bei dem Problem der Strahlung von Seite der elementaren elektromagnetischen Felder einzelner elektrischer Quanten aufzugeben oder zum mindesten fraglich. Von einem Überbordwerfen der Mediumdynamik für die Medien kann keine Rede sein, wohl aber muß man sich bei ihrer extrapolatorischen Übertragung auf Individuen und elementare Prozesse die Frage vorlegen, ob bei ihnen die wirklichen, nicht die dogmatisch bewußt oder unbewußt zurechtgemachten Voraussetzungen den Voraussetzungen der Mediumdynamik entsprechen. In der Tat sind alle bis jetzt gegen die Hypothese der Lichtquanten erhobenen Einwände auf unzutreffende oder unbewiesene Voraussetzungen gegründet.

Eine dogmatische Behandlung der Probleme der Atomdynamik nach den Rezepten der Mediumdynamik würde nicht eine Bereicherung, sondern im Gegenteil eine Hemmung der physikalischen Forschung bedeuten. Was zur Gewinnung von Erkenntnis über die Atome und die elementaren Prozesse an ihnen nottut,

ist die Anstellung von neuen Beobachtungen. Um Anregung zu diesen und Gesichtspunkte für ihre Durchführung zu gewinnen, haben wir aus den bereits vorliegenden Erfahrungen Hypothesen über die physikalischen Individuen zu abstrahieren. Bei der Aufstellung dieser Hypothesen haben wir uns wenig mit der Sorge zu beunruhigen, ob sie schließlich gegenüber neuen Erfahrungen haltbar sein werden; wohl aber haben wir es uns angelegen sein zu lassen, Experimente zur Prüfung der Hypothesen zu ersinnen und auszuführen.

Insofern die vorliegende Schrift über die Prinzipien der Atomdynamik eine Basis für die Gewinnung neuer Erfahrungen oder die Systematisierung bereits bekannter Erfahrungen schaffen will, sind in ihr die Erscheinungen von prinzipieller Bedeutung aus phänomenologischem Detail herausgearbeitet unter Zurückschiebung der experimentellen und theoretischen Technik, welche zu ihrer Beobachtung und Darstellung angewendet werden. Möge sie, wie sie von der Erfahrung ausgeht, zu neuen Erfahrungen führen und so die Entwicklung der physikalischen und chemischen Forschung in der zögernd beschrittenen neuen Richtung der Atomdynamik anregen!

Aachen, März 1910.

---

# Inhalt.

## IV. Kapitel.

### Energie und Struktur des stationären elektromagnetischen Feldes.

## I. Kapitel.

# Prinzipielle Methoden der physikalischen Erkenntnis.

### § 1. Mittel und Grenzen der physikalischen Erkenntnis.

Die prinzipiellen Methoden der Physik sind seit langer Zeit ein erkenntnistheoretisches Problem der Philosophie. Nachdem in der zweiten Hälfte des abgelaufenen Jahrhunderts die Produktion von philosophischen Abhandlungen über sie beträchtlich abgenommen hatte, wendete sich ihnen in der letzten Zeit erneutes Interesse zu, sowohl von philosophischer wie von naturwissenschaftlicher Seite. Es kann nicht Aufgabe der vorliegenden Schrift sein, an diese erkenntnistheoretischen Arbeiten alter und neuer Zeit anzuknüpfen; sie hat prinzipielle Überlegungen nur zu dem Zwecke anzustellen, die Emanzipation von eingelernten Denkweisen zu ermöglichen, eine sowohl den physikalischen Erscheinungen wie dem menschlichen Denkvermögen angepaßte Systematik zu schaffen und vor allem die experimentelle Forschung neu anzuregen. Für den Erkenntnistheoretiker mag sie vielleicht als Material nur insofern historischen Wert haben, als sie zeigt, zu welchen Ansichten über die erkenntnistheoretischen Prinzipien seiner Wissenschaft ein Physiker sich durchgearbeitet hat, der mit vielen einzelnen physikalischen Erscheinungen bekannt ist, die Entwicklung der Physik in den letzten zwei Jahrzehnten mitgemacht hat und den Schwerpunkt seiner Forschung in dem analytischen auf das Prinzipielle zielenden Experiment sieht.

Die physikalische Erkenntnis hat als Aufgabe die Erforschung von Vorgängen, welche sich an Objekten unabhängig von dem

menschlichen Subjekt abspielen; sie benützt hierbei als Mittel das Denk- und Beobachtungsvermögen des menschlichen Subjekts. Daraus ergibt sich, daß die menschliche Physik in ihrem Inhalt zwar objektiv, in ihrer Form dagegen notwendig subjektiv ist. Eine Emanzipation vom Subjektivismus in der Form ist weder wünschenswert noch möglich; wohl aber haben wir darnach zu trachten, daß der Inhalt der physikalischen Erkenntnis rein vom Objekt abgenommen und nicht unbewußt mit Vorstellungen vermischt werde, die vom menschlichen Denkvermögen geformt wurden.

Die physikalische Erkenntnis nimmt ihren Ausgang von der Erfahrung. Diese besteht in der Beobachtung von Veränderungen, in der Herstellung einer Erscheinung unter bestimmten Umständen, in der Definition und vergleichenden Messung gewisser Qualitäten der beobachteten Erscheinungen. Darin, daß die so gewonnene Erkenntnis von verschiedenen Menschen an verschiedenen Orten zu verschiedenen Zeiten auf immer wieder beobachtbare Erscheinungen oder reproduzierbare Vergleichsmaße eindeutig bezogen werden kann, liegt die Objektivität der physikalischen Erkenntnis.

Die Form der physikalischen Erkenntnis ist bedingt durch die Art des Menschen zu beobachten und zu denken. Entsprechend dieser Art wählt der Mensch gewisse Qualitäten der physikalischen Erscheinungen zu ihrer Charakteristik; durch die Methoden seiner Beobachtung wird die Art und der Umfang der physikalischen Erfahrung abgegrenzt. Den ersten Bestandteil der Beobachtungsmethoden selbst bilden die menschlichen Sinne; diesen hat sich bis zu einem gewissen Grad der durch das Objekt vorgeschriebene Teil der Beobachtungsmethode anzupassen.

Von fundamentaler Bedeutung für die physikalische Erkenntnis ist der Umstand, daß die beobachtenden Körper (Sinnesorgane, künstliche Apparate) des Menschen aus einer großen Zahl von Individuen (Atome, Moleküle) sich zusammensetzen und daß demnach ihr Volumen groß ist im Vergleich zu dem Volumen der einzelnen Individuen, welche in letzter Linie, wie die Erfahrung lehrt, die Träger der physikalischen und chemischen Erscheinungen sind. Aus dieser Relation ergaben sich folgende Konsequenzen.

Unsere physikalische Erkenntnis konnte sich zunächst nur auf Vorgänge an Aggregaten von Individuen beziehen; die Erkenntnis der atomistischen Struktur der materiellen Körper konnte erst das indirekte, anfänglich hypothetische Resultat einer umfangreichen mühevollen Forschung sein; die Erkenntnis der Struktur des einzelnen physikalischen Individuums kann, wenn überhaupt mit Sicherheit, nur auf indirekten Wegen gewonnen werden.

Bestände der Mensch aus wenigen Atomen und Molekülen, würde er an einzelnen Atomen oder gar Elektronen beobachten können, so würde seine Physik wesentlich anders sein, als sie wirklich ist; sie würde sich hauptsächlich mit den Eigenschaften der physikalischen Individuen befassen, weniger mit den Wirkungen an Aggregaten zahlreicher Individuen; sie würde von dem Begriff des Individuums ausgegangen und sehr spät, wenn überhaupt, zu dem Begriff des Mediums gekommen sein. Der wirkliche Physiker ist umgekehrt von dem Begriff des Mediums ausgegangen und spät zu dem Begriff des Individuums vorgedrungen. Es ist freilich möglich, daß das Phänomen der Erkenntnis sich nicht an einem Individuum, das nur aus wenigen Atomen besteht, abspielen kann, sondern ein kompliziertes Aggregat von zahlreichen Atomen zur Voraussetzung hat.

Daraus, daß die physikalische Erfahrung immer in einer Relation oder Wechselwirkung zwischen den beobachteten Körpern und den beobachtenden Körpern (Apparate, Sinnesorgane) besteht, folgt mit Notwendigkeit, daß die Resultate der physikalischen Erkenntnis, die beobachteten physikalischen Größen, nicht absolute, sondern nur relative Werte darstellen. Die Erkenntnis der physikalischen Dinge an sich ist weder möglich, noch darum auch notwendig.

Alle physikalischen Erkenntnisse, unsere allgemeinsten Begriffe, wie Raum, Zeit, Substanz, haben ihren Ursprung in der Erfahrung. Folgern wir durch Analysierung oder Variation bekannter Erfahrungen zunächst allein mit den Mitteln unseres Denkvermögens eine neue Relation zwischen physikalischen Größen, so hat diese

so lange keine reale Bedeutung, als wir nicht mit den Mitteln der Beobachtung ihr Korrelat am Objekt nachgewiesen haben.

Durch unsere subjektiven und objektiven Mittel der physikalischen Erkenntnis werden auch deren Grenzen bestimmt. Sie hört einerseits da auf, wo die physikalischen Vorgänge so reich und verwickelt werden, daß unsere Intelligenz sie nicht mehr zu überschauen und zu verfolgen mag. Sie hört andererseits auch da auf, wo die Möglichkeit der Erfahrung aufhört. Die Begrenzung der physikalischen Erkenntnis durch das Unvermögen seines Denkapparates mag den Menschen bedrücken und in ihm das Gefühl der intellektuellen Ohnmacht gegenüber gewissen Naturphänomenen wachrufen. Die Begrenzung seiner Erkenntnis durch die Unmöglichkeit der Erfahrung braucht ihn nicht zu beunruhigen; denn was nicht in den Kreis seiner Erfahrung eintreten kann, hat für ihn keine Bedeutung. Diese Überlegung in positivem Sinne ist auch geeignet, diejenigen zufrieden zu stellen, welche einer jeden Wissenschaft, so auch der physikalischen Forschung die Pflicht auferlegen wollen, dem menschlichen Geschlechte zu nützen. Dieser Pflicht genügen die Physiker bewußt oder unbewußt, absichtlich oder unabsichtlich, indem sie die Erfahrung zur Aufgabe ihrer Arbeit machen; denn als Erfahrung des Menschen gewinnt ein jedes physikalisches Phänomen früher oder später, direkt oder indirekt wenigstens für einen Teil der Menschen eine Bedeutung, welche sie durch das Wort Nutzen charakterisieren können.

Durch diejenigen ihrer Wurzeln, welche im menschlichen Denkvermögen liegen, ist, wie in jede Wissenschaft, so auch in die Physik, die monistische Tendenz hineingekommen. Diese setzt sich zum Ziele, alle physikalischen Erscheinungen in ein einheitliches System zusammenzufassen, an dessen Spitze ein einziger Begriff oder ein einziges Gesetz steht, in dem alle einzelnen Erscheinungen zusammenlaufen. Diese Tendenz mag ihren Grund in der Bequemlichkeit des menschlichen Denkapparates oder, wie man sich auch ausdrücken kann, in einem ästhetischen Bedürfnis des Menschen haben; sie ist jedenfalls vorhanden und hat gerade in der Physik in vielen Fällen eine objektive Rechtfertigung er-

fahren, indem zeigte, daß sich scheinbar verschiedenartige Phänomene zu Gruppen und weiter Gruppen zu noch größeren Systemen sich zusammenfassen ließen. Und wird in dieser Weise die monistische Tendenz zur Systematisierung abgeschwächt, dann ist sie aus zwei Gründen berechtigt, ja sogar eine theoretische Aufgabe.

Die Systematisierung hat nämlich erstens bei der Beschränktheit des menschlichen Denkvermögens im Vergleich zu dem Reichtum der physikalischen Erscheinungswelt die Bedeutung, daß sie die intellektuelle Beherrschung der physikalischen Erscheinungen erleichtert. Zweitens leistet sie der vordringenden Forschung heuristische Dienste, indem sie auf Lücken in der Erfahrung, in den Zusammenhängen verschiedener Erscheinungen aufmerksam macht und die Anregung gibt, diese Lücken erst durch die theoretischen, dann durch die experimentellen Hilfsmittel der Erkenntnis auszufüllen. Freilich darf die Systematisierung hierbei nicht zu weit von der Erfahrung sich entfernen und in monistischer Tendenz ein physikalisches Einheitssystem in der Phantasie aufrichten. Wir müssen vielmehr von vornherein mit der Möglichkeit rechnen, daß die physikalischen Erscheinungen nicht aus einem einzigen Prinzip oder Begriff heraus abgeleitet werden können. Wie in jeder Hinsicht, so hat der Physiker auch in dieser die Erfahrung als letzte Instanz anzurufen und ihr sich zu unterwerfen.

## § 2. Begriff des Atoms und des Mediums.

Als Individuum oder Atom in weiterem Sinne definieren wir ein im Raum existierendes Objekt, zwischen dessen Teilen ein derartiger Zusammenhang existiert, daß es einerseits gegen Einwirkungen von außen zu seiner Erhaltung charakteristische Reaktionskräfte entwickelt und daß es zusammen mit seinen spezifischen Qualitäten zu existieren aufhört, wenn gewisse Teile von ihm getrennt werden. Das Wort Atom wird zwar in der Regel in dem speziellen Sinne des chemischen Atoms gebraucht, indes ist auch schon das Elementarquantum der elektrischen Ladung elektrisches Atom genannt worden, ferner sind wir gewohnt, dem Worte Atomistik einen weiteren Sinn als allein einen chemischen

beizulegen. Aus diesem Grunde und weil das Wort Atom kürzer ist als das gewöhnlich im biologischem Sinne gemeinte Wort Individuum, soll hier vorzugsweise das erstere in dem vorstehenden weiteren Sinne gebraucht werden. Nur wenn es mit dem Beiwort „chemisch" versehen ist oder in Zusammenhang mit chemischen Dingen angewendet wird, soll es das chemische Atom im gewöhnlichen Sinne bedeuten.

Das negative Elektron, das positive Quantum, das chemische Atom und das chemische Molekül sind die Individuen, welche bis jetzt Gegenstand der physikalischen und chemischen Forschung sind.

Gemäß der vorstehenden Definition schreiben wir dem Atom in erster Linie ein Volumen und eine geometrische Struktur zu. Unter letzterer verstehen wir die relative Entfernung und Orientierung seiner Teile. Die Teile eines für sich betrachteten Atoms können auch relativ zueinander eine Bewegung besitzen; diese muß aber so beschaffen sein, daß nach Umlauf einer gewissen Zeitdauer die betrachteten Teile des Atoms relativ zueinander oder relativ zu anderen Teilen wieder die gleiche Konfiguration besitzen oder in derselben Phase sich befinden, wie zu Beginn der Zeitdauer. Wie demnach für ein Atom ein gewisses Raummaß charakteristisch ist, so können ihm auch bestimmte Zeitperioden, Eigenperioden, eigentümlich sein.

Ein Atom kann weiter relativ zu anderen Atomen charakterisiert werden. Tritt ein physikalisches Individuum in Relation zu seiner Umgebung, so geschieht dies, indem sein Volumen, die relative Konfiguration seiner Teile und seine Eigenperioden geändert werden; diese Deformation eines Individuums oder Atoms geht unter Ein- oder Ausströmen von Energie durch seine Grenzen und somit unter Entwicklung von Kräften und Gegenkräften vor sich.

Der Zusammenhang der Teile eines Atoms bedingt, daß die Deformation eines Teiles alle anderen Teile des Atoms, wenn auch in verschiedenem Grade, in Mitleidenschaft zieht, daß somit bei Entwicklung von Kräften und Gegenkräften, bei Einnahme oder Ausgabe von Energie das Individuum als Ganzes in Wirksamkeit tritt.

Nach dem Vorstehenden kann ein Atom im Verkehr mit

anderen Atomen wohl Veränderungen erfahren. Diese mögen sogar so weit gehen, daß einzelne Teile von dem Atom abgetrennt oder Teile fremder Atome aufgenommen werden. Wenn jedoch das Atom als solches weiterexistieren soll, so dürfen diese Veränderungen nicht so groß sein, daß sie von den Reaktionskräften des Atoms nicht wieder rückgängig gemacht werden können.

Gleichartig nennen wir solche Atome, welche unter gleichen Bedingungen gegenüber anderen Atomen sich gleich verhalten, welche also in ihren Wirkungen sich ersetzen lassen. Ihnen schreiben wir den gleichen individuellen Zusammenhang ihrer Teile zu. Die Gleichartigkeit ist die Bedingung dafür, daß Atome gezählt werden können.

Unter einem Aggregat von Atomen verstehen wir eine Anzahl von Atomen, die innerhalb eines bestimmten Volumens vereinigt sind. Die Wirkung eines Aggregats gleichartiger Atome kann öfter quantitativ beschrieben werden durch Angabe der Zahl der Atome und der Wirkung des einzelnen Atoms.

Unter Medium verstehen wir einen Raum, in dem sich eine physikalische Wirkung in der Weise abspielt, daß sie für unsere Beobachtung aneinandergrenzende Elemente des Raumes in kontinuierlichem Übergange erfüllt. Die verschiedenen Volumenelemente eines Mediums betrachten wir als gleichwertig, als durch einander ersetzbar; ihre Abgrenzung gegeneinander ist unserer Willkür überlassen.

Der Begriff des Mediums ist demnach ein Hilfsbegriff zur Beschreibung derjenigen Beobachtungen, bei welchen innerhalb eines gewissen Volumens eines Aggregates Ungleichartigkeit seiner Elemente nicht festgestellt werden kann, sei es aus Unvermögen der Beobachtungsmethode, sei es, weil die Gleichartigkeit objektiv vorhanden ist. Somit kann auch ein Aggregat von Atomen als Medium sich darbieten, wenn unsere Beobachtungen an ihm auf so große Teile des von ihm erfüllten Volumens bezogen werden und sie in ihren Mitteln derartig sind, daß in den kleinsten für sich zur Wirkung gebrachten Volumenelementen noch sehr viele Atome (Individuen) enthalten sind.

## § 3. Methoden der Mediumdynamik.

Bei der Untersuchung der Qualitäten eines physikalischen Aggregates oder Mediums ist Voraussetzung, daß die Werte der beobachteten Größen groß sind im Vergleich zu den entsprechenden Werten der einzelnen Atome (Individuen), aus denen sich das Medium zusammensetzt. Die gemessenen Längen, Zeiten, Kräfte usw. müssen also groß sein relativ zu der an einem einzelnen Atom vorkommenden Länge, Zeit oder Kraft. Werte der physikalischen Größen, welche dieser Forderung genügen, heißen endliche Werte; diejenigen Werte dagegen, welche dem einzelnen Individuum oder Atom zugeeignet werden, mögen individuale oder elementare Werte heißen.

Durch Messung physikalischer Größen an einem endlichen Volumen oder einer endlichen Fläche eines physikalischen Mediums oder an einem endlichen Aggregat läßt sich dieses dadurch charakterisieren, daß auf seine Volumen- oder Flächeneinheit oder auf die Menge Eins physikalische Größen bezogen und als spezifisch definiert werden. Hierauf beruht z. B. die Definition des spez. Gewichts, des Druckes, der elastischen Konstanten, der Elektrisierungskonstanten, der Magnetisierungszahl, der elektrischen und der magnetischen Feldstärke, der spez. Leitfähigkeit, der spez. Wärmetönung, der Lichtintensität.

Einen großen Fortschritt in der Entwicklung der Dynamik des Mediums bedeutete die vor allem von Faraday veranlaßte Einführung des Begriffes der Polarisation eines Mediums oder der räumlichen Verteilung einer gerichteten Größe (Vektor) in einem Medium. Sie erfolgte quantitativ in der Weise, daß einem jeden Punkte des Mediums ein Vektor (Geschwindigkeit, Kraft, Drehmoment, Strom) von bestimmter Richtung und Größe, bezogen auf die Einheit des Volumens, der Fläche, der Menge oder des Momentes zugeordnet wurden. Durch diese quantitative Beschreibung eines Vektorfeldes in einem Medium war die Anwendung der Methoden der analytischen Geometrie auf die Dynamik des Mediums ermöglicht. Als Hauptproblem ergab sich sofort

die Ermittlung der raumzeitlichen Relation zweier sich wechselseitig bedingender Vektoren in einem Medium. Dieses Problem wurde in experimenteller und theoretischer Hinsicht am vollendetsten für den Fall des elektromagnetischen Mediums gelöst und durch Einführung des Begriffes des Verschiebungsstromes gelang es Maxwell, die Verknüpfung des elektrischen, des magnetischen Vektors, des Raumes, der Zeit und der elektromagnetischen Mediumkonstanten (Dielektrizitätskonstante, Permeabilität, Leitfähigkeit, Geschwindigkeit) streng quantitativ und in Übereinstimmung mit der Erfahrung zu formulieren.

Aus der Art der Definition der Mediumkonstanten und Mediumvektoren ergab sich ohne weiteres, daß die Relationen zwischen den Größen im Vektorenfeld für die Einheiten der Zeit, der Länge, des Volumens und der Fläche in Differentialgesetzen oder Differentialgleichungen formuliert werden konnten. Die Definition der in diesen vorkommenden Größen, die Ermittlung ihrer Relation war in erster Linie Aufgabe der experimentellen Forschung, die Diskussion und Lösung der Differentialgleichungen Aufgabe der theoretischen Technik.

Bei der mathematischen Diskussion der Differentialgleichungen des elastischen und vor allem des elektromagnetischen Mediums ergab sich zunächst das wichtige Resultat der Wellenbewegung. Deren Begriff und Gesetze waren bereits zuvor aus der Erfahrung gewonnen worden. Und es war ein großer Triumph der Theorie, daß sie imstande war, aus den Gleichungen der Mediumdynamik die Erfahrungen der Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz von Wellen abzuleiten und neue Phänomene vorherzusagen. Hierbei wurde zunächst das Vorhandensein einer einfachen Wellenbewegung von zentrischer Struktur als gegeben angenommen. In einer Anzahl von Fällen gelang auch die Lösung des weiteren schwierigeren Problems, die Differentialgleichungen für einen bestimmten Anfangszustand des Vektorenfeldes oder einen bestimmten Sender der Wellenbewegung zu integrieren.

Hier erhoben sich freilich bereits bedeutende Schwierigkeiten, insofern der strengen Mediumdynamik eine Unterscheidung zwischen

dem Medium und einem dagegen abgegrenzten Sender fremd waren. Indes kann auch dieses Problem der Emission und der Absorption einer Wellenbewegung in einem Medium unter folgenden Voraussetzungen noch nach den Methoden der Mediumdynamik experimentell und theoretisch behandelt werden. Erstens ist Voraussetzung, daß der Oszillator oder Sender endlich ist, daß er sich also aus einer großen Anzahl von Atomen zusammensetzt. Zweitens ist Voraussetzung, daß das umgebende Medium durch eiue endliche Fläche oder ein endliches Volumen mit dem Sender in Relation steht; es muß also in der Fläche oder dem Volumen, welche in Relation zum Oszillator stehen, eine große Anzahl von Atomen liegen.

Die Erfolge der Mediumdynamik, vor allem diejenigen auf dem Gebiete der elektromagnetischen Wellen, waren so zahlreich, daß ihre Denkweise die meisten Forscher zu beherrschen begann, daß sich der Begriff des Mediums und seiner Gesetze überall in den Vordergrund drängte. Ohne ein „Medium" können selbst heute noch viele Gelehrte sich keinen oszillatorischen Vorgang im Raume denken, und es ist begreiflich, daß man sich als Träger der Wellen elektromagnetischer Energie ein „Medium", den Weltäther, konstruierte zur „Erklärung" der Erfahrung, daß elektromagnetische Wellen auch in einem von Materie freien Raum verlaufen können. Man war nur konsequent, wenn man diesem auch Mediumkonstanten zueignete und ihn von den elektromagnetischen Oszillatoren unterschied.

Wie immer eine Denkweise oder eine Vorstellung, wenn sie einmal von ihren Bildnern und Meistern in eine breite Masse von lernenden Menschen gedrungen ist, mit Intoleranz ihre Herrschaft auch auf Gebiete ausdehnen will, für welche ihre Voraussetzungen nicht zutreffen, so geht es auch mit der Denkweise der Mediumdynamik. Sicher geworden durch die großen Erfolge dieser Denkweise treten ihre Virtuosen mit dem Anspruch auf, mit ihrer Hilfe auch Probleme lösen zu können, in denen nicht mehr große Aggregate von Atomen in Relation treten, sondern einzelne Atome. In Verkennung der Voraussetzungen für die Definitionen der Mediumdynamik übertragen sie die Gesetze

der Volumenelemente des Mediums auf die Volumenelemente des einzelnen Atoms oder extrapolieren von Relationen zwischen Aggregaten auf Relationen zwischen Atomen (Individuen); dabei sind sie sich wenig klar darüber, daß sie bei Übertragung der Mediumdynamik auf das Atom Hypothese auf Hypothese häufen, sind vielmehr eher geneigt, die Auffassung von einer besonderen Dynamik des Atoms als Spekulation oder Phantasterei zu bezeichnen.

Nun lag es in den Mitteln der physikalischen Erkenntnis des Menschen begründet, daß er zunächst eine Dynamik der seiner Beobachtung sich darbietenden Medien schuf; die Methoden und Resultate der Dynamik der Aggregate und Medien genügen zudem den technischen Anwendungen der physikalischen Erscheinungen; sie werden auch in der Physik immer gebraucht werden müssen, wo die Voraussetzungen ihrer Anwendbarkeit gegeben sind. Es kann keine Rede davon sein, daß wir die eminenten Errungenschaften der Mediumdynamik über Bord werfen, diese selbst durch eine andere Dynamik ersetzen wollen, wenn wir zur Ermittlung und Beschreibung der Qualitäten des einzelnen Individuums (Atoms) eine andere dem neuen Problem angepaßte Denkweise einführen wollen. Es handelt sich nicht darum, die wertvolle Mediumdynamik aufzugeben, sondern darum, neben sie, zum Teil mit ihrer Hilfe, eine andere Dynamik für solche Probleme zu setzen, bei denen sie versagt.

Wenn die Voraussetzung zutraf, daß die vom Menschen untersuchten Aggregate und Medien aus zahlreichen Atomen sich zusammensetzen, dann mußte einmal in der Entwicklung der Mediumdynamik der Moment kommen, wo sie bei weiterer theoretischer oder experimenteller Analyse auf Erscheinungen stieß, welche sie nicht mehr verstehen noch darstellen konnte, weil bei ihnen ihre Voraussetzungen nicht mehr erfüllt waren, daß die beobachteten oder in Rechnung gestellten Werte physikalischer Größen endlich, nicht elementar sind. Und die Erfahrung hat in der Tat ergeben, daß die physikalischen Aggregate und Medien aus zählbaren einzelnen Atomen sich zusammensetzen. Diese Erfahrung hat für die physikalische Erkenntnis die Konsequenz, daß eine neue Art von

Dynamik, die Dynamik der Atome oder Individuen, zu entwickeln ist.

Der Begriff des Individuums oder Atoms im weiteren Sinne ist in der Physik und Chemie freilich nicht erst kürzlich gebildet worden. Vor allem die Chemie hat mit ihm in der speziellen Hypothese des chemischen Atoms und Moleküls schon ein Jahrhundert lang gearbeitet, und von ihr hat ihn zunächst auch die Physik übernommen. Indes wurde er nicht einmal für diesen Spezialfall, denjenigen des chemischen Atoms, über die ersten rohen Anfänge hinaus weitergebildet, und auch von der Physik nicht mit mehr Inhalt als von der Chemie gefüllt. Dieser Stillstand der Entwicklung der Atomdynamik war sachlich in dem Mangel an Erfahrungen über die physikalischen und chemischen Atome begründet. Erst die neuen Erfahrungen vom elektrischen Elementarquantum und dem negativen Elektron waren der Anlaß und boten die objektive Möglichkeit, den Begriff des Atoms weiter zu entwickeln und mit Bewußtsein und Absicht eine neue Denkweise zur Erkenntnis der Erscheinungen an den einzelnen Atomen einzuführen. Es wird freilich vieler Zeit und Mühe zum Ausbau der Dynamik der physikalischen und chemischen Atome bedürfen. Deren Probleme liegen insofern viel schwieriger als diejenigen der Mediumdynamik, als gemäß der Struktur des Menschen und seiner Beobachtungsmittel die Vorgänge an dem einzelnen Atom zumeist nur indirekt aus der Beobachtung des Verhaltens vieler Atome erschlossen werden können.

Zwischen der weitgehend ausgearbeiteten Mediumdynamik und der erst in den Anfängen vorhandenen Atomdynamik steht vermittelnd eine Denkweise, welche erst in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurde und bis jetzt noch wenig Verbreitung gefunden hat; es ist die statistische Dynamik.

Die Beobachtung der thermischen Erscheinungen führte im Verein mit der Hypothese der chemischen Atome und Moleküle zu der Erkenntnis, daß der thermische Zustand der materiellen Körper als eine Verteilung von Energie an zahlreiche diskrete Massenteilchen aufzufassen sei. Diese Vorstellung wurde speziell

für den gasförmigen Zustand eines Aggregats von zahlreichen diskreten Teilchen und für diesen Fall wieder unter der speziellen Voraussetzung durchgearbeitet, daß an die diskreten Massenteilchen lediglich kinetische Energie verteilt sei. Für diesen Fall ließ sich der thermische Zustand als eine ungeordnete Verteilung von kinetischer Energie an die unabhängig voneinander beweglichen Massenteilchen oder Moleküle definieren; Unordnung ist hierbei insofern vorhanden, als in einem Volumen, welches viele Moleküle enthält, eine große Anzahl von molekularen Geschwindigkeiten, die nach Größe und Richtung voneinander verschieden sind, vorkommen und das einzelne Molekül während einer Zeitdauer, welche groß ist, verglichen mit der Zeit zwischen zwei Zusammenstößen mit anderen Molekülen, infolge zahlreicher Zusammenstöße zahlreiche nach Richtung und Größe verschiedene Geschwindigkeiten annimmt.

Da das Beobachtungs- und Denkvermögen des Menschen diesem komplizierten und rasch wechselnden Spiel der Verteilung von Energie an Massenteilchen nicht mehr im einzelnen, weder mit der Denkweise der Medium- noch mit derjenigen der Atomdynamik zu folgen vermag, so führt der Physiker für die thermischen Erscheinungen eine neue Betrachtungsweise ein. Er verzichtet darauf, an den einzelnen Molekülen die einzelnen Werte der unregelmäßig veränderlichen physikalischen Größen (freie Weglänge, Geschwindigkeit, Energie) festzustellen, und begnügt sich mit der Ermittlung von Durchschnitts- oder Mittelwerten dieser Größen an einer großen Zahl von Molekülen oder an einem Molekül während einer relativ langen Zeit. Die Beobachtung, daß ein Aggregat sehr vieler Moleküle während einer relativ sehr langen Zeit gewisse Eigenschaften, z. B. das Volumen oder den Druck, nicht mehr ändert, obwohl an seinen einzelnen Molekülen ununterbrochen die Bewegung sich ändert, führt zu der Annahme, daß der thermische Zustand stationär sein kann, und daß dann die Zahl des wiederholten Vorkommens eines jeden möglichen Wertes einer thermisch veränderlichen Größe, z. B. der Energie, an den Molekülen zeitlich konstant ist.

Zur Charakteristik des stationären Zustandes der Verteilung von relativer Bewegung auf die Moleküle eines Aggregats wurde der Begriff der Temperatur eingeführt und zu deren quantitativer Definition die Messung einer mit dem thermischen Zustand variablen Größe, z. B. des Druckes eines vollkommenen Gases, benutzt. Die Angabe einer Temperatur für ein Aggregat von diskreten Teilchen hat, wie man sieht, das Vorhandensein einer großen Anzahl von einzelnen, unabhängig voneinander bewegten Teilchen zur Voraussetzung, sowie das Vorhandensein eines stationären Zustandes in der Verteilung einer Größe. Es hat sich nun durch Vergleich der Theorie mit der Erfahrung gezeigt, daß von allen möglichen Verteilungen einer Energiemenge an eine Zahl ungeordnet bewegter Teilchen diejenige Verteilung, welche an der Teilchenzahl am öftesten vorgenommen werden kann, welche also die wahrscheinlichste ist, auch die wirkliche im stationären Zustand ist.

Ihre höchste Entwicklung hat die statistische Denkweise oder die Thermodynamik bis jetzt gefunden in der Aufstellung des Maxwell-Boltzmannschen Gesetzes der ungeordneten Verteilung von kinetischer Energie an unabhängig bewegte Massenteilchen und in der Ableitung des Planckschen Gesetzes der ungeordneten Verteilung von Strahlungsenergie an Wirkungsquanten. Insofern als sie ihre Betrachtungen auf Aggregate zahlreicher Atome (Individuen) bezieht, ist die Thermodynamik der Mediumdynamik verwandt; insofern sie eine Verteilung von Energie an eine endliche Zahl von sich gleich verhaltenden Teilchen vornimmt, operiert sie bereits mehr oder weniger bewußt mit dem Fundamentalbedriff der Atomdynamik.

Die Denkweisen der Mediumdynamik, der Thermodynamik und der Atomdynamik können keine exklusive Herrschaft in der physikalischen Erkenntnis beanspruchen. Eine jede ist unter den für sie zutreffenden Voraussetzungen berechtigt; sie arbeiten sich gegenseitig in die Hände. Sie wurzeln alle drei halb in der Eigenart des Objekts, halb in der Eigenart des menschlichen Denkvermögens; am wenigsten paßt sich dem theoretischen und

experimentellen Können des Menschen die Atomdynamik an; indem sie sich die objektive Erforschung der Elemente der physikalischen und chemischen Erscheinungen zum Ziel setzt.

Die vorstehende Charakteristik der Methoden der Mediumdynamik war deswegen notwendig, weil die Grenzen der Anwendbarkeit dieser Denkweise festzustellen waren und die Notwendigkeit darzulegen war, auf die Probleme der physikalischen und chemischen Atome (Individuen) eine andere Denkweise anzuwenden.

## § 4. Aufgaben und Methoden der Atomdynamik.

Als erste Aufgabe der Atomdynamik erhebt sich das Problem, an den physikalischen und chemischen Atomen elementare oder individuale Werte zu bestimmen, welche das Atom als Ganzes charakterisieren, so die Ladung der elektrischen Quanten, das Quantum der elementaren Wirkung, die Masse der chemischen Atome. Diese Aufgabe fällt zum Teil mit der Aufgabe zusammen, die Gesetze der Kraft zu ermitteln, welchen das einzelne Atom in seiner Relation zu einem Aggregat von Atomen unterworfen ist; als Beispiel hierfür sei genannt die Kraft auf ein einzelnes elektrisches Quantum seitens eines endlichen elektrischen oder magnetischen Feldes eines Aggregates von elektrischen Quanten.

Die zweite ungleich schwierigere Aufgabe der Atomdynamik besteht darin, über die geometrische Struktur der physikalischen und chemischen Atome, die relative Lage, Orientierung, Bewegung und relative Kraft ihrer Teile direkt oder indirekt aus der Erfahrung Aufschluß zu gewinnen. Die Lösung dieser Aufgabe ist verknüpft mit der Lösung der Aufgabe, die Relation eines Atoms zu einem zweiten Atom zu ermitteln. Als Beispiel für die Probleme dieser Art sei genannt die geometrische Struktur des Elektrons und des positiven Qantums, die relative Kraft zweier chemischer Atome.

Die dritte Aufgabe der Atomdynamik ist die Ableitung der Strukturen von Aggregaten und Medien und die atomistische Interpretation der Qualitäten der physikalischen Medien, so der Struktur eines elektrischen oder magnetischen Aggregatfeldes oder

eines Kristalles, der Strahlung eines endlichen Aggregates von Oszillatoren.

Als experimentelle Methode der Atomdynamik kommt in erster Linie folgendes Verfahren in Betracht. Eine Anzahl gleichartiger Atome wird derselben Reaktion gegen ein beobachtendes Aggregat unterworfen; der beobachtete Reaktionswert ist dann entweder der Reaktionswert $k$ des einzelnen Individuums oder er ist gleich $zk$, wo $z$ die Zahl der Atome ist.

Die direkteste Methode der Atomdynamik bestände darin, Reaktionen an einzelnen Atomen oder elementare Vorgänge zu beobachten. Ob dies freilich dem Menschen, der als kompliziertes Aggregat gezwungen ist mit Aggregaten zu beobachten, gelingen wird, ist fraglich. Immerhin erscheint es ermutigend, daß er bei den radioaktiven Prozessen bereits zur Beobachtung des Eintretens eines Ereignisses an einzelnen Atomen vorgedrungen ist.

Solange die Zahl der direkten experimentellen Methoden der Atomdynamik gering ist, müssen wir indirekte Methoden heranziehen, die darin bestehen, daß wir über die Qualitäten der Individuen solche Hypothesen aufstellen, daß sich aus ihnen beobachtete Qualitäten von Medien oder Aggregaten ableiten lassen. Der Wert und die Wahrscheinlichkeit derartiger Hypothesen wird um so größer, je mehr verschiedenartige Aggregatqualitäten sich aus ihnen ableiten lassen und je mehr Vorhersagen von neuen Aggregatphänomenen sich realisieren lassen.

Wenn uns nun auch die Schwierigkeit der Probleme der Atomdynamik zu häufiger Bildung von Hypothesen zwingt, so müssen wir uns dabei doch große Vorsicht und Zurückhaltung auferlegen, dürfen uns vor allem mit ihnen nicht zu weit von der Kontrolle durch die Erfahrung entfernen und müssen immer darauf bedacht sein, Experimente zu ersinnen und anzustellen, welche eine Prüfung der Hypothesen gestatten. Und mag es uns gerade im Anfang der Entwicklung der Atomdynamik oft schmerzlich fallen, daß wir eine Frage experimentell nicht beantworten können oder Relationen zwischen verschiedenartigen Kraftäußerungen von Atomen nicht

zu erkennen vermögen, es wird besser sein, unseren Mangel an Erfahrung oder Erkenntnisvermögen einzugestehen, statt uns bei Theorien zu beruhigen, welche unter einem glänzenden mathematischen Gewand willkürliche, oft unbewußt für dieses zurechtgemachte Hypothesen verhüllen.

---

II. Kapitel.

# Atomistische Struktur der elektrischen Ladung und der elektromagnetischen Medien.

## § 5. Definition der elektrischen Ladung.

Als Maßeinheit für die Kraft ($\mathfrak{K}$), welche an einem Körper angreift, ist in der Physik die Dyne definiert worden auf Grund der willkürlichen Definition einer Einheit für die Länge (cm), für die Zeit (sec) und für die Masse (g); die Dimension der Dyne in diesem Maßsystem ist $g\,cm\,sec^{-2}$. Die Dyne oder ein Vielfaches derselben kann in verschiedenen Kraftformen realisiert werden. Indem einer der Größe und Richtung nach zu messenden Kraft, welche an einem Körper angreift, eine so große Kraft von bekannter Dynenzahl entgegengesetzt wird, daß der Körper keine Geschwindigkeitsänderung durch die erste Kraft erfährt, kann diese gemessen werden; sie ist nämlich dann entgegengesetzt und gleich der sie kompensierenden Dynenzahl.

Der elektrische Zustand, in dem sich zwei Körper befinden, kann erkannt werden durch die Kraft, welche sie aufeinander ausüben. Sind die Dimensionen der Körper klein relativ zu dem Abstand ihrer Mittelpunkte, so liegt die Richtung der an einem jeden Körper angreifenden Kraft in der Verbindungslinie der Mittelpunkte der zwei Körper; die zwei Kräfte sind einander entgegengesetzt und gleich groß. Es gilt also

$$\mathfrak{K}_{12} = -\mathfrak{K}_{21}.$$

Variiert man die Entfernung $r$ zwischen den zwei Körpern unter der Voraussetzung, daß sie klein bleibt relativ zu den Dimensionen

der Körper, dann ergibt die Messung der elektrischen Kraft $\mathfrak{K}_e$ an einem der zwei Körper, daß sie umgekehrt proportional ist dem Quadrat der Entfernung; es gilt also die Relation

$$\mathfrak{K}_e = \frac{k}{r^2},$$

worin der Proportionalitätsfaktor $k$ die Dimension $g\,cm^3\,sec^{-2}$ hat.

Auf Grund der Erfahrung der Mitteilung des elektrischen Zustandes durch Berührung zweier Körper haben wir uns die Hypothese gebildet, daß die elektrische Kraft als Ursprungs- und Angriffsort eine Substanz hat, welche nicht identisch ist mit der Gesamtmenge des Körpers, welche vielmehr auf den Körper gebracht und von ihm weggenommen werden kann. Diese hypothetische Substanz, welcher der Ursprungs- und Angriffsort der elektrischen Kraft ist, wurde demgemäß als die elektrische Ladung eines Körpers oder als Elektrizität bezeichnet. Der Begriff der Menge der elektrischen Ladung, der bereits in dem Substanzbegriff der Elektrizität enthalten war, wurde dann in folgender Weise mit Hilfe der Messung der elektrischen Kraft quantitativ ausgebaut.

Zwei elektrisch geladene Körper, welche auf einen dritten elektrisch geladenen Körper eine gleich große Kraft ausüben, besitzen gleich große Ladungen von Elektrizität. Die elektrische Ladung einer Kugel sei in willkürlichem Maße gleich $e$; $m$ gleiche Kugeln, von denen jede für sich die Ladung $e$ besitzt, sollen miteinander zu einem Aggregat verbunden werden; es werde dann als dessen Gesamtladung die Größe $me$ definiert. Ein zweites Aggregat werde aus $n$ gleichen je mit der elektrischen Menge $e$ beladenen Kugeln zusammengesetzt, seine Gesamtladung ist dann gemäß Definition gleich $ne$. Beobachtet man nun die elektrische Kraft zwischen den Ladungen $ne$ und $me$ in einem großen Abstand $r$, indem man $n$, $m$ und $r$ variiert, so findet man die Beziehung

$$\mathfrak{K}_e = k \frac{(ne) \times (me)}{r^2}. \tag{1}$$

Die Kraft, welche also eine elektrische Ladung erfährt und ausübt, ist proportional dem Produkt der zwei Ladungen. Diese einfache Relation zwischen Kraft, elektrischer Ladung und Abstand

kann dazu dienen, die letztere durch Beobachtung der Kraft und der räumlichen Distanz zu messen. Nimmt man in der vorstehenden Gleichung den Proportionalitätsfaktor $k$ willkürlich als dimensionslose Zahl an und setzt diese gleich eins, so ergibt sich für die elektrische Ladung als Dimension in dem gewählten Maßsystem (cm g sec) der Wert $g^{1/2}\,cm^{3/2}\,sec^{-1}$ gemäß der Gleichung der elektrischen Kraft zwischen zwei gleich großen Ladungen ($e$)

$$\mathfrak{K}_e = \frac{e^2}{r^2}.$$

Wie empirisch festgestellt worden ist, können alle elektrisch geladenen Körper in zwei Gruppen geordnet werden in der Weise, daß die elektrisierten Körper einer und derselben Gruppe wechselseitig sich abstoßen, zwei Körper aus verschiedenen Gruppen wechselseitig sich anziehen. Diese Erfahrung formulieren wir mit Hilfe des Begriffes der elektrischen Ladung in dem Satz, daß es zwei Arten von Elektrizitäten gibt; um ihr polares Verhalten in der wechselseitigen Kraft zu charakterisieren, bezeichnen wir die eine Art von Elektrizität als positiv, die andere als negativ; und zwar ist willkürlich diejenige Ladung als negativ bezeichnet worden, welche beispielsweise eine Zinkplatte in dem System Zinkplatte-Schwefelsäure-Kupferplatte annimmt.

Zur quantitativen mathematischen Beschreibung der Umgebung einer elektrischen Ladung hat man den Begriff der elektrischen Feldstärke ($\mathfrak{E}$) angeführt. Darunter versteht man die elektrische Kraft, welche an der Elektrizitätsmenge eins in dem betrachteten Punkte des Feldes angreifen würde. Für die Kraft $\mathfrak{K}$ auf die punktförmige Ladung $E$ in dem betrachteten Punkte mit der elektrischen Feldstärke $\mathfrak{E}$ gilt demnach

$$\mathfrak{K}_e = E\,\mathfrak{E}. \qquad (2)$$

Geometrisch wird die Feldstärke $\mathfrak{E}$ in einem Punkte durch Linien dargestellt, deren Tangenten in dem betrachteten Punkte die Richtung von $\mathfrak{E}$ in diesem Punkte haben und deren Zahl normal zu 1 $cm^2$ gleich der Zahl der Einheiten der Maßzahl von $\mathfrak{E}$ ist. Das elektrische Feld heißt in einem Raumteil homogen, wenn innerhalb desselben $\mathfrak{E}$ überall denselben Wert und dieselbe Richtung hat,

oder mit anderen Worten, wenn die Kraftlinien überall dieselbe Dichte und dieselbe Richtung haben.

Als elektrischer Kraftfluß durch eine Fläche wird die algebraische Summe $\Sigma \mathfrak{E}_n df$ oder das Integral $\int \mathfrak{E}_n df$ definiert, wo $\mathfrak{E}_n$ die auf dem Flächenelement $df$ senkrecht stehende Komponente von $\mathfrak{E}$ bedeutet. Eine leichte Rechnung auf Grund des Kraftgesetzes

$$\mathfrak{K}_e = \frac{E_1 E_2}{r^2}$$

ergibt, daß der Kraftfluß, welchen eine Ladung $E$ durch eine sie ganz umschließende Fläche oder in den Raumwinkel $4\pi$ sendet, gleich ist $4\pi E$; es gilt also

$$\int_0 \mathfrak{E}_n df = 4\pi E.$$

Die vorstehenden Definitionen und Gesetze sind unter der Voraussetzung gültig, daß die elektrischen Körper, welche eine Kraft aufeinander ausüben, im Vakuum, d. h. in einem von Materie freien Raum sich befinden. Hier werde zunächst gemäß der obigen Definition ihre Ladung $E_1$ bez. $E_2$ ermittelt und die zwischen ihnen wirkende Kraft zu $(\mathfrak{K}_e)_v = \frac{E_1 E_2}{r^2}$ bestimmt. Werden darauf die zwei elektrischen Körper ohne Änderung ihrer Ladungen in ein materielles, sie isolierendes Medium eingebettet, so ergibt sich für denselben Abstand eine kleinere Kraft $(\mathfrak{K}_e)_m$. Das Verhältnis

$$\frac{(\mathfrak{K}_e)_v}{(\mathfrak{K}_e)_m} = D \tag{3}$$

wird als Dielektrizitätskonstante des materiellen Mediums definiert (vgl. § 7). Es ist Übung, die elektrische Ladung eines Körpers immer auf den Wert im Vakuum zu reduzieren, indem unter $\mathfrak{K}_e$ bez. $\mathfrak{E}$ die in einem beliebigen Medium wirklich beobachtete Kraft bez. Feldstärke verstanden und die Dielektrizitätskonstante des Mediums angegeben wird. Es resultieren gemäß diesen Festsetzungen die Definitionsgleichungen

$$\mathfrak{K}_e = \frac{E_1 E_2}{D r^2} \text{ und} \tag{4}$$

$$\int_0 \mathfrak{E}_n df = 4\pi D E. \tag{5}$$

Es mag manchem Leser überflüssig erscheinen, daß hier eine ausführliche Analyse der Definition der elektrischen Ladung gegeben wird. Es ist dies indes notwendig, bevor das Problem der elementaren Ladung in Angriff genommen wird; und es ist um so mehr notwendig, als man mitunter selbst bei ernsten Gelehrten einer falschen Auffassung von der Definitionsgleichung der elektrischen Ladung begegnet. Der Begriff der Elektrizitätsmenge hat sich nämlich so sehr eingebürgert, daß man öfter seinen hypothetischen Ursprung vergißt und in den obigen Gleichungen nicht bloß in ihrer Aussage über die Abhängigkeit der Kraft von der Entfernung, sondern auch in ihrer Aussage über die elektrische Ladung Gesetze sieht, in denen die elektrische Ladung als eine für sich meßbare, unabhängig von der beobachtbaren Kraft gegebene Größe auftritt. Demgegenüber muß daran erinnert werden, daß die Gleichungen (4) und (5) lediglich Definitionen der elektrischen Ladung unter bestimmten Voraussetzungen darstellen.

Die erste Voraussetzung für die Definition der elektrischen Ladung durch jene Gleichungen ist, daß der elektrisch geladene Körper, dessen Ladung durch Messung einer Kraft und einer Raumdimension bestimmt werden soll, relativ zum Beobachter ruht. Über diese Voraussetzung geht die Behauptung hinaus, daß der elektrische Kraftfluß durch eine den Körper umhüllende Fläche und darum die durch ihn definierte Ladung denselben Wert habe, möge der geladene Körper relativ zum Beobachter ruhen oder bewegt sein, z. B. auf einem Kreis sehr rasch rotieren.

Die zweite Voraussetzung ist, daß die Fläche, auf welcher der Kraftfluß von seiten des umschlossenen geladenen Körpers beobachtet wird, ein beträchtlich größeres Volumen als die Körperoberfläche umhüllt.

Drittens ist die obige Abhängigkeit der Kraft von der Entfernung experimentell bis jetzt nur für Ladungen erwiesen worden welche größer sind als $10^{-5}$ Einheiten in dem gewählten Maßsystem. Ob jenes Gesetz auch für beliebig kleine Ladungen gilt und wie weit sich sehr kleine Ladungen realisieren lassen, bedarf der besonderen experimentellen Untersuchung.

## § 6. Elementarquantum der Elektrizität, elektrische Kraft auf ein elektrisches Quantum.

Die kleinste elektrische Ladung, welche wir mit unseren empfindlichsten Instrumenten auf einem Körper nachweisen können, ist, wie bereits oben bemerkt wurde, größer als $10^{-5}$ stat. Einh. Um noch kleinere elektrische Ladungen herzustellen und indirekt zu bestimmen, kann man daran denken, eine große Anzahl nahezu gleich großer, eben noch sichtbarer Wassertröpfchen je mit einer gleich großen Ladung zu versehen. Die Geschwindigkeit, mit welcher eine solche Tröpfchenwolke fällt, ist dann identisch mit der Geschwindigkeit, mit welcher das einzelne elektrisch geladene Tröpfchen fällt; die Fallgeschwindigkeit der Tröpfchenwolke und indirekt somit die des einzelnen Tröpfchens kann gemessen werden. Aus der Geschwindigkeit $v_1$, welche die Tröpfchen allein unter der Wirkung der Erdschwere annehmen, aus dem Reibungskoeffizienten $\varrho$ der Luft kann die Masse $m$ des einzelnen Tröpfchens berechnet werden gemäß den Formeln

$$v_1 = \frac{2}{9}\frac{gr^2}{\varrho} = kmg$$

$$m = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{9}{2}\frac{\varrho v_1}{g}\right)^{3/2}$$

worin $r$ den Radius des Tröpfchens, $g$ die Erdbeschleunigung, $k$ eine Konstante bedeutet. Um von $v_1$ weiter zur elektrischen Ladung des einzelnen Tröpfchens zu gelangen, kann man zwei Wege einschlagen. Entweder kann man mit J. S. Townsend[1]) und J. J. Thomson[2]) sowohl die Wassermenge $M$ der ganzen Tröpfchenwolke und ihre gesamte elektrische Ladung $E$ bestimmen; die Ladung des einzelnen Tröpfchens ist dann gleich $e = \frac{Em}{M}$. Oder man kann mit H. A. Wilson[3]) einmal die elektrisch geladene Tröpfchenwolke allein unter der Wirkung der Erdschwere die Fallgeschwindigkeit $v_1$ annehmen, sodann eine ganz analog

1) J. S. Townsend, Phil. Mag. **45**, 125, 1898; Phil. Trans. **193**, 129, 1899.
2) J. J. Thomson, Phil. Mag. **46**, 528, 1898; **48**, 557, 1899.
3) H. A. Wilson, Phil. Mag. **5**, 429, 1903.

erzeugte Tröpfchenwolke in einem elektrischen Felde von der Stärke $\mathfrak{E}$ fallen lassen, jedes Tröpfchen mit der Ladung $e$ also außer der Erdschwere noch der beschleunigenden Wirkung der elektrischen Kraft $e\mathfrak{E}$ unterwerfen und die neue Fallgeschwindigkeit $v_2$ messen. Es gilt dann

$$v_2 = k\,(mg + e\mathfrak{E}).$$

Durch Kombination der zwei vorstehenden Gleichungen läßt sich dann $e$ aus der Gleichung

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{mg + e\mathfrak{E}}{mg}$$

berechnen.

Die Messung der Tröpfchenladung nach einer von diesen beiden Methoden mag dem Fernerstehenden einfach zu sein scheinen, sowie überhaupt einmal eine Wolke gleich großer und gleich geladener Tröpfchen hergestellt ist. Schwieriger mag ihm gerade die Erfüllung dieser Bedingung vorkommen. Indes ist gerade umgekehrt diese leichter als jene Messung. Es wird nämlich die elektrische Ladung nicht auf das einzelne vorgebildete Tröpfchen gebracht, sondern die einzelne elektrische Ladung dient als Kern für die Bildung des einzelnen Tröpfchens.

Die Beobachtung lehrt, daß gesättigter Wasserdampf z. B. durch eine adiabatische[1]) Dilatation beträchtlich abgekühlt und übersättigt werden kann, wenn er in einem staubfreien Gas, z. B. in Luft verteilt ist. Wenn indes in dem Gemisch Wasserdampf-Luft einzelne kleine frei bewegliche elektrische Ladungen („Ionen") vorhanden sind, dann kann der Wasserdampf durch adiabatische Dilatation nicht soweit wie zuvor übersättigt werden. Es beginnt vielmehr, wie die Erfahrung lehrt, bei einem gewissen Grad von Übersättigung zunächst an den negativen Ionen im Dampfraum das Niederschlagen von flüssigem Wasser, bei einem etwas höheren

---

1) Adiabatisch heißt die Dilation deswegen, weil sie so rasch erfolgt, daß während ihrer Dauer keine Wärme durch die Begrenzung des sich dilatierenden Systems hindurchgeht. Die Abkühlung des sich adiabatisch dilatierenden Gasgemisches erfolgt deswegen, weil die bei der Dilation nach außen geleistete Arbeit dem Wärmeinhalt des Gasgemisches entnommen wird.

Grad von Übersättigung beginnt die Kondensation auch an den positiven Ionen. Man kann nun die Übersättigung gerade so groß wählen, daß die Kondensation nur an den negativen, nicht an den positiven Ionen statthat; man erhält dann eine Wolke von negativ geladenen Tröpfchen, und auf diese kann man eine der zwei obigen Methoden anwenden.

Warum die kleinen frei beweglichen elektrischen Ladungen, die Ionen, dem Wasserdampf als Kondensationskerne dienen, warum die negativen Ionen bei geringerer Übersättigung kondensierend wirken als die positiven Ionen, die Beantwortung dieser Fragen soll uns hier nicht aufhalten. Wir haben die Tatsache der Tröpfchenbildung an kleinen elektrischen Ladungen zu benützen, um deren Größe zu bestimmen. Um von der Tröpfchenwolke zu dem einzelnen Tröpfchen, von der Gesamtladung auf die Einzelladung und zwar nicht auf einen durchschnittlichen Wert der Einzelladung, sondern auf einen an allen Tröpfchen in gleicher Größe vorkommenden Wert der Einzelladung zu gelangen, haben wir dafür zu sorgen, daß alle Tröpfchen und alle Einzelladungen mit großer Annäherung gleich sind, oder daß, wenn überhaupt, Abweichungen von einem gemeinsamen Wert vorkommen, sie gleich so groß sind, daß die Tröpfchen, an welchen sie vorkommen, hinter der Bewegung der Wolke gleicher Tröpfchen zurückbleiben oder ihr voraneilen, so daß sie nicht in die Messungen an jener Wolke eingehen. Es liegt auf der Hand, daß die Bildung gleich großer Tröpfchen das Vorhandensein gleich großer Ladungen zur Voraussetzung hat, da durch diese die Kondensation bestimmt wird. Sind einerseits die gleich großen Ladungen angenähert gleichmäßig in einem Teil des Dampfraumes verteilt, so ist plausibel, daß die einzelnen Ladungen aus ihren Umgebungen nahezu gleich große Mengen übersättigten Dampfes heranholen und somit gleich große Tröpfchen bilden werden. Es bleibt also das Problem, im Dampfraum eine große Anzahl gleich großer kleiner Ladungen zu erzeugen, die jedenfalls beträchtlich kleiner sind als $10^{-5}$ stat. Einh.

Wie man leicht einsieht, hängt die Lösung dieses Problems in letzter Linie nicht von menschlicher Experimentierkunst, sondern

von einer in der Wirklichkeit unabhängig vom Menschen vorgegebenen Konstitution der elektrischen Ladungen ab. Nur wenn in der Wirklichkeit zahlreiche praktisch gleich große Einzelladungen vorkommen und, wenn diese Einzelladung ein Minimum darstellt, das jedenfalls durch den sie schaffenden, sie frei beweglich machenden Prozeß nicht weiter geteilt werden kann, nur dann werden wir ein physikalisches Experiment so leiten können, daß wir gemäß der obigen Folgerung eine große Anzahl gleich großer Einzelladungen und somit gleich großer Wassertröpfchen realisieren können. Und gelingt uns dies Experiment, gesucht oder ungesucht, dann haben wir das Recht, aus ihm den Schluß zu ziehen, daß die in der Wirklichkeit vorkommenden Elektrizitätsmengen in der Weise atomistisch konstituiert sind, daß sie sich aus zählbaren, für uns voneinander nicht zu unterscheidenden Individuen oder Atomen zusammensetzen, die wohl voneinander getrennt, aber einzeln für sich nicht mehr geteilt werden können, ohne daß sie aufhören überhaupt zu existieren. Von diesem Standpunkt aus übersieht man die für die ganze Naturwissenschaft fundamentale Bedeutung des Experimentes der Bildung gleich großer Wassertröpfchen an einer großen Anzahl gleich großer elektrischer Ladungen. Gelingt dieses Experiment, so ist eine zuverlässige experimentelle Basis für die physikalische und chemische Atomistik geschaffen. Aus ihm und anderen Erfahrungen, speziell aus den Erscheinungen, in denen die elektrischen Individuen mit materiellen Teilchen gekoppelt erscheinen, folgt dann mit Notwendigkeit der Schluß, daß die materiellen Körper, die Massen des Chemikers und Physikers, atomistisch konstituiert, also aus zählbaren, mit sehr großer Annäherung gleichartigen Individuen oder Atomen aufgebaut sind.

Das Experiment, dessen Bedeutung im Vorstehenden dargelegt wurde, ist nun in der Tat geglückt und sogar nach verschiedenen Methoden. Läßt man z. B. Röntgenstrahlen für einen Moment durch einen Raum mit gesättigtem Wasserdampf gehen und unterwirft man diesen unmittelbar nach dem Aufhören der Strahlung einer adiabatischen Dilatation von geeigneter Größe, so

erhält man eine Wolke negativ geladener Tröpfchen, auf welche man eine der oben beschriebenen Methoden zur Bestimmung der elektrischen Einzelladung anwenden kann. Oder man kann an den Dampfraum eine Metallplatte grenzen lassen und diese kurze Zeit ultraviolett belichten; unterwirft man unmittelbar darauf den Dampf einer adiabatischen Dilatation, so erhält man ebenfalls eine Wolke negativ geladener Tröpfchen. Oder man kann die bei gewissen chemischen Reaktionen oder bei der Elektrolyse gewisser Flüssigkeiten entwickelten Gase erst mit Wasserdampf sättigen und dann abkühlen; auch auf diese Weise erhält man eine Wolke positiver oder negativer Wassertröpfchen.

Wir können uns hier nicht mit den Fragen aufhalten, auf welche Weise bei diesen Prozessen die Einzelladungen erzeugt werden, in welchem Zusammenhang sie mit den materiellen Teilchen stehen. Wir haben die Resultate der obigen Untersuchungen ins Auge zu fassen. Zunächst hat sich das wichtige Resultat ergeben, daß die kleinste elektrische Einzelladung $e$, das elektrische Elementarquantum, unabhängig von der Art des materiellen Körpers, in dem oder aus dem sie erzeugt wurde, den gleichen Wert besitzt. Die genauesten Messungen, die von Begeman[1]) angestellt wurden, haben für das elektrische Elementarquantum den Wert $e = 4{,}7 \cdot 10^{-10}$ stat. Einh. geliefert. Dieser Wert hat sich sowohl für das Minimum der positiven als der negativen Ladung ergeben. Für die positive Ladung wurde er zwar auch direkt ermittelt; er folgt aber in dieser Größe auch indirekt aus folgender Überlegung. Vor der Abtrennung der negativen Elementarquanten wies nach außen hin der diese abgebende materielle Körper keine elektrische Gesamtladung auf, also muß in ihm hinsichtlich des elektrischen Kraftflusses nach außen jedes negative Elementarquantum durch ein gleiches großes positives Elementarquantum neutralisiert gewesen sein. Endlich ergab sich noch das experimentelle Resultat, daß, wenn an einzelnen Tröpfchen überhaupt größere Ladungen vorkommen, diese ein ganzes Vielfaches des Elementarquantums sind.

---

1) L. Begeman, Phys. Rev. 31, 41, 1910.

Die atomistische Struktur der Elektrizitätsmengen ist demnach überraschend einfach. Während es in der Chemie eine große Anzahl von Atomtypen gibt, die sich aus gleichartigen zählbaren Individuen zusammensetzen, gibt es, wenigstens was die Größe der Ladung betrifft, nur ein negatives und nur ein positives Individuum und deren Ladung ist zudem gleich groß und nur dem Vorzeichen nach verschieden.

Die Feststellung der atomistischen Konstitution der Elektrizität hat noch in folgender Hinsicht Bedeutung. Es ist oben betont worden, daß die elektrische Ladung zunächst nur eine Definitionsgröße ist auf Grund der Hypothese, daß sie den Charakter einer additionsfähigen Substanz oder Menge habe. Nachdem nunmehr durch die Erfahrung ermittelt wurde, daß sie in bestimmten gleichartigen Quanten auftritt, ist es sehr wahrscheinlich geworden, daß der Inhalt jener Hypothese der Wirklichkeit entspricht. Während zuvor die elektrische Ladung nur durch ihren beobachtbaren Kraftfluß gegeben war, können wir nunmehr die elektrische Ladung als das primär Gegebene betrachten, deren Kraftfluß für den Fall, daß sie relativ zum Beobachter ruht, bekannt ist; wir können nunmehr fragen, was ein Beobachter wahrnimmt, wenn sich eine elektrische Ladung relativ zu seinen Beobachtungskörper bewegt.

Gemäß dem Vorstehenden haben wir jede endliche Ladung $E$ als ein Aggregat einer bestimmten ganzen Zahl gleichartiger räumlich getrennt existierender Ladungsindividuen oder elektrischer Ladungsquanten von der Größe $e$ zu betrachten. Gemäß Gleichung (2) ist die elektrische Kraft $\mathfrak{K}_e$ auf ein Quantenaggregat $E$ in einem homogenen Felde von der bekannten Stärke $\mathfrak{E}$

$$\mathfrak{K}_e = E\mathfrak{E}.$$

Da wir $E$ aus $n$ gleichartigen Quanten von der Ladung $e$ zusammenzusetzen haben, so schließen wir, extrapolierend von endlichen Werten von $E$ und $\mathfrak{K}$ auf die Kraft für $n = 1$, daß die elektrische Kraft auf ein einzelnes elektrisches Quantum in dem elektrischen Felde $\mathfrak{E}$ eines endlichen Quantenaggregates durch die Gleichung gegeben wird

$$\mathfrak{K}_e = e\mathfrak{E}. \tag{6}$$

Voraussetzung für die Gültigkeit dieses zunächst hypothetischen Quantengesetzes ist, daß $\mathfrak{E}$ im Gebiete von $e$ homogen und während der Beobachtungsdauer konstant ist, sowie daß $e$ relativ zu dem beobachtenden Aggregatfelde ruht.

## § 7. Atomistische Struktur des leitenden Mediums.

Die diskontinuierliche Struktur der elektrischen Ladungen hat zur Folge, daß in einem Volumen eine Anzahl positiver Quanten mit einer Anzahl negativer Quanten gemischt sein kann. Sind die beiden Zahlen gleich groß, so ist der gesamte elektrische Kraftfluß durch eine das Volumen umhüllende geschlossene Fläche und somit die eingeschlossene Gesamtladung Null.

Es gibt nun zwei Möglichkeiten für die Beziehung zwischen den einzelnen positiven und negativen Quanten innerhalb des Volumens eines Körpers. Erstens können die positiven und die negativen Quanten unabhängig voneinander frei beweglich sein, in diesem Falle heißen sie Ionen und der Körper selbst dank ihrer Gegenwart ein elektrischer Leiter. Zweitens können die positiven Quanten so an die negativen Quanten gebunden sein, daß sie nicht durch eine beliebig kleine äußere Kraft relativ zueinander in Bewegung versetzt werden können, sondern daß eine äußere Kraft lediglich ihre relative Lage so weit ändert, daß sie kompensiert wird durch eine innere Kraft zwischen den einzelnen Quanten, welche infolge der Lageänderung zur Entwicklung kommt.

Lassen wir auf die Ionen in einem leitenden Medium eine Kraft, z. B. diejenige eines elektrischen Feldes von seiten einer endlichen Ladung, wirken, so geraten die einzelnen positiven und die einzelnen negativen Quanten in der Richtung der Kraft in Bewegung. Durch einen senkrecht zur Kraftrichtung stehenden Querschnitt treten einzelne positive und negative Quanten hindurch. Wir richten nun die Beobachtung so ein, daß wir während einer endlichen Zeit $dt$ den Durchgang einer endlichen Ladungsmenge $dE$ durch den Querschnitt erhalten und setzen die Richtung der Bewegung der positiven Ladung als positiv fest. Als Stromstärke der positiven

Ladung $i_p = \frac{dE_p}{dt}$ definieren wir dann die positive Ladungsmenge. welche in der Zeiteinheit in ihrer Bewegungsrichtung durch den Querschnitt $q$ hindurchtritt; als Stromstärke der negativen Ladung $i_n = \frac{dE_n}{dt}$ definieren wir die Menge negativer Ladung, welche in der Zeiteinheit durch den Querschnitt tritt, und ordnen dieser positives Vorzeichen zu, wenn die negative Ladung entgegengesetzt zur Richtung der positiven durch den Querschnitt tritt. Als elektrischen Strom $i$ definieren wir die Summe $i = i_p + i_n$.

Wie die endliche elektrische Ladung selbst, so besitzt auch der endliche elektrische Strom eine atomistische Struktur; er setzt sich aus zahlreichen einzelnen Quanten zusammen, die mit einer gewissen Geschwindigkeit durch einen Querschnitt hindurchtreten. Hierbei sind zwei extreme Fälle möglich.

Es können erstens alle Quanten mit der gleichen Geschwindigkeit durch den Querschnitt hindurchtreten; dieser Fall kann durch einen mechanischen Konvektionsstrom[1]) oder durch ein Bündel von gleich schnellen positiven oder negativen elektrischen Strahlen (vgl. § 11) realisiert werden.

Zweitens können die verschiedenen Quanten mit verschiedenen Geschwindigkeiten durch den Querschnitt treten, indem sie einzeln z. B. ihre Geschwindigkeit durch Zusammenstoß mit benachbarten Teilchen verringern und darauf unter dem Antrieb der auf sie wirkenden Kraft in der Zeit zwischen zwei Zusammenstößen wieder vergrößern. Ändern so die Ionen unabhängig voneinander zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten ihre Geschwindigkeit im elektrischen Strome, dann treten sie mit verschiedenen Geschwindigkeiten durch einen Stromquerschnitt. Dieser Fall liegt vor bei dem Strom in einem gewöhnlichen leitenden Medium.

1) Ein mechanischer Konvektionsstrom wurde zuerst von Rowland realisiert, indem er eine elektrisch geladene Kreisscheibe um ihre Achse sehr rasch rotieren ließ und seine ablenkende Wirkung auf eine Magnetnadel beobachtete. Ein zusammenfassender Bericht über die Untersuchung des mechanischen Konvektionsstromes ist von Eichenwald (Jahrb. d. Rad. u. El. 5, 82, 1908) gegeben worden.

Ein derartiger Leitungsstrom stellt also einen sehr komplizierten Bewegungsvorgang dar; die Zusammensetzung des leitenden Mediums aus frei beweglichen elektrischen Quanten und nicht elektrischen Teilchen hat durch die Zusammenstöße der ersteren mit den letzteren einen Einfluß auf die Stärke des Stromes. Erzeugen wir diesen z. B. mit Hilfe eines elektrischen Feldes, das die Stärke $\mathfrak{E}$ in dem betrachteten Querschnitt $q$ hat, so liefert die Beobachtung von $i$, $\mathfrak{E}$ und $q$ das Resultat, daß bei konstanter Stromstärke die Größe $\frac{i}{\mathfrak{E} q} = \lambda$ eine für ein jedes leitende Medium charakteristische Konstante ist; sie wird spez. elektrische Leitfähigkeit genannt. Diese kann in folgender Weise atomistisch interpretiert werden.

Wir nehmen an, daß das leitende Medium nur eine Art positiver und nur eine Art negativer Ionen enthält, daß deren Ladung gleich $e$ sei und daß die Zahl sowohl der positiven wie der negativen Ionen in der Volumeneinheit gleich $n$ sei. Nun idealisieren wir die in Wirklichkeit äußerst unregelmäßige Bewegung der Ionen hinsichtlich ihrer Strömung durch einen Querschnitt in folgender Weise.

Während zweier aufeinanderfolgender Zusammenstöße erfährt jedes einzelne Ion durch die elektrische Kraft $e\mathfrak{E}$ einen Geschwindigkeitszuwachs in der Richtung von $e\mathfrak{E}$, es bewegt sich somit bald mit einer größeren, bald mit einer kleineren Geschwindigkeit in der Richtung von $e\mathfrak{E}$ vorwärts. Statt mit den verschiedenen einzelnen Geschwindigkeiten zu rechnen, welche es auf einer Strecke, auf welcher $\mathfrak{E}$ konstant ist, der Reihe nach annimmt, rechnen wir mit einer mittleren Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$, die es unverändert behalten müßte, um im Felde $\mathfrak{E}$ während der gesamten Zeit der einzelnen Werte ebenso weit in der Richtung von $\mathfrak{E}$ vorwärts zu kommen, als es wirklich geschieht. Da alle Ionen gleichen Vorzeichens gleich sind, so haben wir für einen jeden Stromquerschnitt eine mittlere Geschwindigkeit $\mathfrak{v}_p$ der positiven und eine mittlere Geschwindigkeit $\mathfrak{v}_n$ der negativen Ionen zu definieren und alle positiven bez. negativen Ionen in Gedanken mit der gleichen

Geschwindigkeit $\mathfrak{v}_p$ bez. $\mathfrak{v}_n$ durch den betrachteten Stromquerschnitt treten zu lassen. Wir erhalten somit die Relationen

$$\frac{dE_p}{dt} = i_p = qne\mathfrak{v}_p, \tag{7}$$

$$\frac{dE_n}{dt} = i_n = qne\mathfrak{v}_n, \tag{8}$$

$$i = i_p + i_n = qne(\mathfrak{v}_p + \mathfrak{v}_n) = q\lambda\mathfrak{E}, \tag{9}$$

$$\lambda = ne\left(\frac{\mathfrak{v}_p}{\mathfrak{E}} + \frac{\mathfrak{v}_n}{\mathfrak{E}}\right) = ne(v_p + v_n) \tag{10}$$

Da $\lambda$ eine von $\mathfrak{E}$ unabhängige Konstante ist, so müssen die Größen $\frac{\mathfrak{v}_p}{\mathfrak{E}} = v_p$ und $\frac{\mathfrak{v}_n}{\mathfrak{E}} = v_n$ Konstanten sein. Sie werden spez. Ionengeschwindigkeiten genannt und stellen die mittlere Geschwindigkeit dar, welche das positive bez. negative Ion in einem elektrischen Feld von der Stärke eins in dem betrachteten Medium annimmt.

Nach der vorstehenden atomistischen Interpretation des elektrischen Stromes in einem leitenden Medium ist es leicht, die Voraussetzungen für die Definition der spez. Leitfähigkeit und des Leitungsstromes zu erkennen. Die Mediumskonstante $\lambda$ kann nämlich nur dann definiert werden, ein Ohmscher Leitungsstrom bildet sich also gemäß dem Gesetz $i = q\lambda\mathfrak{E} = ne(v_p + v_n)\mathfrak{E}$ nur dann aus, wenn erstens die Strecke, auf welcher $\mathfrak{E}$ konstant ist, groß ist verglichen mit der mittleren freien Weglänge $l_m$ der Ionen und wenn zweitens die Zeitdauer, während welcher $\mathfrak{E}$ konstant ist, groß ist verglichen mit der mittleren freien Zeit $\frac{l_m}{\mathfrak{v}_m}$ der Ionen. Sind diese Bedingungen erfüllt, dann läßt sich die Strömung als stationär betrachten. Die Definition der spez. Leitfähigkeit ist gemäß dem Vorstehenden nicht mehr möglich für stark verdünnte Gase[1]) $\left(l_m \text{ groß relativ } \mathfrak{E} \middle| \frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial l}\right)$ und für gewöhnliche Leiter bei relativ kleiner Periode der elektrischen Kraft. Die Maxwellschen Gleichungen des elektromagnetischen leitenden Mediums sind darum auf das Gebiet kleiner Wellenlängen $\lambda < 5 \cdot 10^{-5}$ cm nicht mehr anwendbar.

1) J. Stark, Die Elektrizität in Gasen, Leipzig 1902, S. 294.

## § 8. Atomistische Struktur des dielektrischen Mediums.

Nach Erledigung der atomistischen Interpretation des leitenden Mediums gehen wir über zur Charakteritik und atomistischen Interpretation der Konstante des dielektrischen Mediums. Wir stellen eine endliche positive Ladung $E$ einer gleich großen negativen Ladung parallel in einem endlichen Abstand so gegenüber, daß der Kraftfluß in parallelen Linien von der einen zur anderen Ladung läuft, daß also das elektrische Kraftfeld zwischen $E_p$ und $E_n$ homogen ist. Wir messen die Ladungen $E$, die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ zwischen ihnen und den Querschnitt $q$ des Feldes normal zu seiner Richtung. Füllen wir dann das Feld zwischen $E_p$ und $E_n$ mit einem nichtleitenden materiellen Medium aus und variieren die Größe von $E$ und somit diejenige von $\mathfrak{E}$, so finden wir, daß das Verhältnis

$$\frac{4\pi E}{q\mathfrak{E}} = D \tag{11}$$

eine für ein jedes Medium charakteristische Konstante ist (vergl. § 5). Wir bezeichnen $D$ als die Dielektrizitätskonstante des untersuchten Mediums.

Die Abhängigkeit des von einer Ladung ausgehenden elektrischen Kraftflusses von dem Medium, in dem er verläuft, erklären wir aus der Anwesenheit von gebundenen positiven und negativen Quanten in dem Medium. Wir ordnen jedem gebundenen positiven Quantum ein gebundenes negatives Quantum zu und bezeichnen sie als ein Quantenpaar (elektrischer Dipol); den Abstand der Mittelpunkte der Quanten eines Paares nennen wir die Länge des Quantenpaares. Jedes Quantenpaar in dem dielektrischen Medium besitzt ein elementares elektrisches Feld. Ist in der Orientierung der Quantenpaare keine Ordnung vorhanden, sondern haben deren Längen verschiedene Richtungen oder wechseln sie mit der Zeit durch die Wirkung der thermisch ungeordneten Stöße der Körperteilchen oder Moleküle, dann ist der gesamte Kraftfluß durch einen endlichen Querschnitt im dielektrischen Medium Null. Stellen wir indes ein homogenes elektrisches Feld normal zu dem Querschnitt $q$ her, dann werden durch dieses die

den Querschnitt mit ihrer Länge schneidenden Quantenpaare in bezug auf die Richtung des Feldes ($\mathfrak{E}$) orientiert; ein jedes Quantenpaar liefert eine Kraftflußkomponente normal durch $q$ entgegengesetzt der Richtung von $\mathfrak{E}$; hierbei können die von verschiedenen Paaren herrührenden Komponenten verschieden groß sein und auch die Komponente des einzelnen Paares kann während der endlichen Beobachtungsdauer eine große Zahl verschiedener Werte annehmen. Indem wir indes den Querschnitt $q$ so groß machen, daß er die Längen einer großen Anzahl von Quantenpaaren schneidet, und indem wir die Beobachtungsdauer, während welcher $\mathfrak{E}$ konstant ist, relativ zu der mittleren Zeitdauer zwischen zwei Änderungen der Lage und Länge eines Quantenpaares groß wählen, erhalten wir einen zeitlich konstanten Wert des gesamten Kraftflusses von seiten der Quantenpaare, welche den Querschnitt $q$ schneiden.

Den elektrischen Kraftfluß $q\mathfrak{E}$ durch den betrachteten Querschnitt des dielektrischen Mediums können wir demnach zusammensetzen aus dem Kraftfluß $4\pi E$ von seiten der Ladung $E$ und dem Kraftfluß $-4\pi\varepsilon q\mathfrak{E}$ von seiten der Quantenpaare, die den Querschnitt $q$ schneiden. Es gilt also

$$q\mathfrak{E} = 4\pi E - 4\pi\varepsilon q\mathfrak{E}. \qquad (12)$$

Durch Kombination mit der obigen Definitionsgleichung (11) für die Dielektrizitätskonstante erhalten wir

$$q\mathfrak{E} = qD\mathfrak{E} - 4\pi\varepsilon q\mathfrak{E} \text{ oder}$$

$$D - 1 = 4\pi\varepsilon. \qquad (13)$$

Gemäß dieser Relation muß die Größe $\varepsilon$ ebenso wie die Dielektrizitätskonstante $D$ eine Konstante sein. Die Größe $4\pi\varepsilon$ oder $D-1$ bedeutet offenbar den gesamten elektrischen Kraftfluß, welchen die Quantenpaare der Einheit des Querschnittes durch diesen entgegen der Richtung des äußeren Feldes bei der Stärke $\mathfrak{E} = 1$ senden. Nehmen wir an, daß nur gleichartige Quantenpaare im dielektrischen Medium vorhanden sind und daß die Längen von $n$-Paaren die Querschnittseinheit durchsetzen, dann können wir jedem Quantenpaar einen mittleren Kraftfluß $k$ zuordnen, den es

während der Beobachtungsdauer durch den Querschnitt im Felde $\mathfrak{E} = 1$ sendet. Es gilt nämlich dann

$$nk = D - 1 \text{ oder}$$
$$D = 1 + nk. \tag{14}$$

Auf Grund der vorstehenden Darlegungen ist leicht zu ersehen, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit der Begriff des dielektrischen Mediums und die Definition der Dielektrizitätskonstante anwendbar ist. Es muß erstens das Volumen, innerhalb dessen $\mathfrak{E}$ als homogen den endlichen Beobachtungskörpern sich darbietet, groß sein im Vergleich zu dem Volumen des elementaren Feldes eines Quantenpaares, es muß also eine große Zahl von Quantenpaaren den Querschnitt eines homogenen endlichen Feldes schneiden. Zweitens muß die Zeitdauer, während welcher $\mathfrak{E}$ in seinem Querschnitt konstant ist, groß sein relativ zu den an den einzelnen Quantenpaaren vorkommenden Änderungsperioden. Sobald das Volumen des betrachteten elektrischen Feldes nur mehr wenige Quantenpaare umfaßt, wie es z. B. bei den Reaktionen [1]) zwischen chemischen Atomen oder Molekülen der Fall ist, hat es keinen Sinn mehr, auf dasselbe die oben definierte Dielektrizitätskonstante eines Mediums anzuwenden. Das gleiche gilt, wenn die Zeitperioden von $\mathfrak{E}$ von der Ordnung der Änderungsperioden der Quantenpaare werden. Die Maxwellschen Gleichungen des elektromagnetischen Mediums können darum nicht mehr auf solche dielektrische Medien angewendet werden, die Quantenpaare enthalten, deren Periode von der Ordnung der Periode des äußeren Feldes $\mathfrak{E}$ ist; aus diesem Grunde verlieren sie für die meisten materiellen Körper im Gebiete der kurzen elektromagnetischen Wellen ihre Gültigkeit.

Zwischen den Eigenschaften „dielektrisch" und „leitend" besteht ein Zusammenhang. Daraus, daß in einem dielektrischen Medium aneinander gebundene positive und negative Quanten

1) So ist es verfehlt, die elektrolytische Dissoziation und die ablenkenden Atomkräfte auf ein einzelnes Elektron (Kathodenstrahl) mit der Dielektrizitätskonstante eines Mediums in Zusammenhang bringen zu wollen.

3*

vorhanden sind, folgt, daß das Medium leitend werden kann, indem durch geeignete Energiezufuhr von außen seine Quantenpaare zum Teil dissoziiert oder ionisiert, d. h. in frei bewegliche positive und negative Quanten, Jonen, zerlegt werden. Umgekehrt können die Ionen eines leitenden Mediums durch wechselseitige Bindung zu Quantenpaaren das Medium dielektrisch machen. Und im allgemeinen wird ein materielles Medium gleichzeitig dielektrisch und leitend sein, so daß es durch Angabe einer Dielektrizitätskonstante und einer spez. Leitfähigkeit als Medium für ein endliches elektrisches Feld und einen endlichen elektrischen Strom zu charakterisieren ist.

Man hat versucht, aus der elektrischen Leitfähigkeit und aus der Dielektrizitätskonstante [1]) auf Qualitäten der einzelnen Quanten oder Quantenpaare in einem Medium zu schließen. Doch ist ein solcher Schluß prinzipiell bedenklich und ohne Kontrolle durch ein zuverlässigeres Verfahren höchst unsicher. Denn jene Mediumkonstanten enthalten nur Mittelwerte von Qualitäten der Individuen relativ zu ihrer Umgebung und sind darum von der Temperatur abhängig.

Wie wir in den zwei vorhergehenden Abschnitten gefolgert haben, baut sich ein leitendes materielles Medium atomistisch aus positiven und negativen Quanten auf, die unabhängig voneinander unter Reibung infolge der Zusammenstöße mit anderen Teilchen beweglich sind; analog baut sich das dielektrische materielle Medium atomistisch aus Quantenpaaren auf, welche einer Orientierung durch ein äußeres elektrisches Feld fähig sind. Nach Gewinnung dieser Resultate erhebt sich die Frage, welcher Zusammenhang zwischen den freien und gebundenen elektrischen Quanten und den materiellen Teilchen eines leitenden und dielektrischen Mediums besteht.

Zu einer vorläufigen kurzen Beantwortung dieser Frage haben

---

1) Wie wenig die Dielektrizitätskonstante zur Charakterisierung der individuellen Qualität eines chemischen Atoms oder Moleküls dienen kann, geht aus einem zusammenfassenden Bericht von G. Rudorf (Jahrb. d. Rad. u. El. **7**, 38, 1910) hervor.

wir hier eine weiter unten experimentell begründete Folgerung als Hypothese einzuführen, nämlich den Satz, daß die materiellen Körper, welche Gegenstand der chemischen Analyse sind, atomistisch aus elementaren materiellen Teilchen (Individuen), den chemischen Atomen, sich aufbauen. Ihnen wird in dem materiellen Körper selbst eine bestimmte Masse zugeeignet; ferner werden sie durch ihr relatives chemisches Verhalten bei der Bildung von Verbindungen charakterisiert.

Nach Einführung der Hypothese des chemischen Atoms spezialisiert sich das oben aufgeworfene Problem zu der Frage nach dem Zusammenhang zwischen den elektrischen Quanten und den chemischen Atomen eines materiellen Mediums. Wir werden später Erfahrungen kennen lernen, aus welchen hervorgeht, daß elektrische Quanten mit chemischen Atomen zu Individuen verbunden erscheinen. Wir dürfen darum annehmen, daß auch in dem leitenden und dielektrischen Medium die elektrischen Quanten und die chemischen Atome nicht gesondert als prinzipiell verschiedene Substanzen nebeneinander existieren, sondern daß die Quantenpaare Teile der chemischen Atome sind, daß also im Innern oder auf der Oberfläche der chemischen Atome positive und negative elektrische Quanten festgebunden vorkommen. Daß ein Atom bei Abtrennung eines elektrischen Quantums ein positives und ein negatives Ion liefert, ergibt sich hieraus von selbst.

Den chemischen Atomen haben wir demnach elementare elektrische Felder zuzueignen. Es wäre eine Willkür, anzunehmen, daß das elektrische Feld eines chemischen Atoms lediglich das elektrische Feld zwischen einem positiven und einem negativen Quantum sei. Wir haben vielmehr mit der Wahrscheinlichkeit zu rechnen, daß ein chemisches Atom im allgemeinen mehrere Quantenpaare umfaßt, deren feste relative Orientierung von Atom- zu Atomart variiert. Die Größe des elektrischen Kraftflusses, welchen ein chemisches Atom in der Richtung eines äußeren Feldes zu liefern vermag, wird bedingt durch die relative Orientierung seiner Quantenpaare; er kann sehr klein sein, obwohl

zwischen seinen einzelnen zusammengekoppelten Quanten der Kraftfluß groß ist.

## § 9. Magnetisches Moment, elementare Geschwindigkeit, magnetische Kraft auf ein elektrisches Quantum.

Wir stellen aus drahtförmigen (linearen) Leitern zwei Stromkreise her; der eine Kreis habe den Radius $r_1$, der andere den Radius $r_2$; der Radius $\varrho_1$ bzw. $\varrho_2$ des Leiter- und somit Stromquerschnitts sei klein relativ zu $r_1$ bzw. $r_2$. Die Stromstärke in dem einen Kreis sei $i_1$, in dem anderen $i_2$. Wir stellen den Kreis 2 fest auf, so daß er nicht bewegt werden kann. Den Kreis 1 stellen wir in einem Abstand $R$ von dem anderen auf, der groß relativ $r_1$ und $r_2$ ist, und ordnen ihn drehbar um seinen Mittelpunkt an. $R$ stehe senkrecht zur Achse des Kreises 2, die Achse ($\mathfrak{M}_1$) des Kreises 1 stehe erst auch senkrecht zu $R$, also parallel der Achse ($\mathfrak{M}_2$) des Stromkreises 2. Überlassen wir in dieser Stellung die zwei Stromkreise, so verharren sie in ihr. Drehen wir indes die Achse des Stromkreises 1 um den Winkel $\varphi = \sphericalangle\,(\mathfrak{M}_1, \mathfrak{M}_2)$ aus jener parallelen Lage heraus, so beobachten wir die Entwicklung eines entgegengesetzten Drehmomentes an dem Stromkreis 1. Dieses wirkt um eine Achse, welche senkrecht steht auf der Ebene durch die Stromachse $\mathfrak{M}_1$ und parallel zur Stromachse $\mathfrak{M}_2$; seine Größe ist gleich $\mathfrak{D}_{12} \sin \varphi = \mathfrak{D}_{12} \sin (\mathfrak{M}_1, \mathfrak{M}_2)$.

Wir untersuchen nun weiter experimentell die Abhängigkeit der Direktionskraft $\mathfrak{D}_{12}$ auf den beobachtenden Stromkreis 1. Bei Variation von $i_2$ und $r_2{}^2$ finden wir $\mathfrak{D}_{12}$ proportional diesen Größen; wir setzen $\mathfrak{D}_{12}$ darum proportional dem Produkt $i_2 r_2{}^2 \pi$. Ebenso finden wir durch die Beobachtung, daß $\mathfrak{D}_{12}$ proportional dem Produkt $i_1 r_1{}^2 \pi$ ist. Diese Produkte nennen wir die magnetischen Momente der Stromkreise und setzen $\mathfrak{M}_1 = i_1 r_1{}^2 \pi$ und $\mathfrak{M}_2 = i_2 r_2{}^2 \pi$. Bei Variation von $R$ finden $\mathfrak{D}_{12}$ proportional $R^3$. Wir erhalten somit die Beziehung

$$\mathfrak{D}_{12} = \frac{1}{c^2} \frac{\mathfrak{M}_1 \mathfrak{M}_2}{R^3} = \frac{\mathfrak{M}_1}{c} \cdot \frac{\mathfrak{M}_2}{c} \cdot \frac{1}{R^3}. \tag{15}$$

Bevor wir zur Ermittlung des Wertes des Proportionalitäts-



faktors $c$ übergehen, suchen wir seine physikalische Bedeutung auf. Die elektrische Strömung in jedem Stromkreis besteht in einer zyklisch geschlossenen Bewegung von elektrischen Quanten. Ist die in dem Querschnitt $q$ vorhandene spezifische Zahl der Ionen $n$, deren mittlere Geschwindigkeit $\mathfrak{v} = \mathfrak{v}_p + \mathfrak{v}_n$ ist, so ist der Wert der zwei Kreisströme $2 r_1 \pi i_1 = 2 r_1 \pi q_1 n_1 e \mathfrak{v}_1$ bzw. $2 r_2 \pi i_2 = 2 r_2 \pi q_2 n_2 e \mathfrak{v}_2$, die Werte der gesamten bewegten Elektrizitätsmengen sind $E_1 = 2 q_1 r_1 \pi n_1 e$ bzw. $E_2 = 2 q_2 r_2 \pi n_2 e$; somit sind die Werte der Kreisströme auch gleich $E_1 \mathfrak{v}_1$ bzw. $E_2 \mathfrak{v}_2$. Die Momente dieser Kreisströme in bezug auf ihre Mittelpunkte sind

$$\mathfrak{M}_1 = i_1 r_1{}^2 \pi = \frac{1}{2} E_1 \mathfrak{v}_1 r_1 \text{ bzw.} \tag{16a}$$

$$\mathfrak{M}_1 = i_2 r_2{}^2 \pi = \frac{1}{2} E_2 \mathfrak{v}_2 r_2. \tag{16b}$$

Durch Benutzung dieser Relationen erhalten wir

$$\mathfrak{D}_{12} = \frac{1}{c^2} \frac{i_1 r_1{}^2 \pi \cdot i_2 r_2{}^2 \pi}{R^3} \text{ oder}$$

$$\mathfrak{D}_{12} = \frac{1}{2} E_1 \frac{\mathfrak{v}_1}{c} r_1 \cdot \frac{1}{2} E_2 \frac{\mathfrak{v}_2}{c} r_2 \cdot \frac{1}{R^3} \text{ oder}$$

$$\mathfrak{D}_{12} = \frac{1}{4} \frac{E_1 E_2}{R^2} \frac{\mathfrak{v}_1}{c} \frac{\mathfrak{v}_2}{c} \frac{r_2}{R} r_1. \tag{17}$$

Nun hat die Direktionskraft $\mathfrak{D}_{12}$ die Dimension des Produktes einer Kraft ($\mathfrak{K}$) in eine Länge ($r_1$) und oben haben wir die Definition der Elektrizitätsmenge so festgelegt, daß die Größe $\frac{E_1 E_2}{R^2}$ die Dimension einer Kraft $\mathfrak{K}$ haben soll. Daraus folgt dann, daß die Größen $\frac{\mathfrak{v}_1}{c}$ und $\frac{\mathfrak{v}_2}{c}$ lediglich Verhältniszahlen ohne Dimension sein müssen, daß somit der Proportionalitätsfaktor $c$ dieselbe Dimenson wie $\mathfrak{v}$ haben, also die Bedeutung einer Geschwindigkeit haben muß.

Es ist gemäß dem Vorstehenden ein Resultat der Erfahrung, daß die Direktionskraft zwischen bewegten elektrischen Ladungen der Größe nach abhängig ist von einer Geschwindigkeit ($c$), die konstant und unabhängig ist von der räumlichen ($R$) und raumzeitlichen

(v) Relation der in Reaktion tretenden Ladungen. Diese Erfahrung der absoluten Existenz einer Geschwindigkeit hat dieselbe weittragende Bedeutung wie die Erfahrung der Existenz von elektrischen Elementarquanten. Wie die Größe des einzelnen elektrischen Elementarquantums unabhängig von der Relation auf andere Individuen universell gegeben ist, so ist auch die Geschwindigkeit $c$ unabhängig von jeder Relation zweier Individuen und universell. Da sie die Größe der Reaktion zwischen elektrischen Quanten bestimmt, so dürfen wir sie dem elektrischen Atom als eine Eigenschaft an sich zueignen, welche charakteristisch ist für eine Änderung zwischen den Teilen des Individuums. Macht man diese Annahme, dann ist verständlich, daß die Geschwindigkeit $c$ als messender oder zählender Faktor in alle Relationen zwischen elektrischen Individuen eingehen muß, die in einer Änderung der Konfiguration der einzelnen Individuen ihren Ursprung haben. Insofern die Geschwindigkeit $c$ eine Qualität des Innern der elektrischen Quanten ist und alle relativen Geschwindigkeiten der Quanten nur im Verhältnis zu ihr in Betracht kommen, sei sie elementare Geschwindigkeit genannt. Sie läßt sich ihrer Größe nach auf Grund der Gleichungen (15) und (16) durch Messung von $i_1$ ($g^{1/2}\,cm^{3/2}\,sec^{-2}$), $i_2$, $r_1$, $r_2$, $R_2$(cm) und der Direktionskraft $\mathfrak{D}_{12}$ ($g\,cm^2\,sec^{-2}$) bestimmen, und zwar haben Messungen nach dieser und nach anderen Methoden ergeben $c = 3 \cdot 10^{10}\,cm\,sec^{-1}$.

Wie im zweiten Teile dieser Schrift genauer dargelegt werden wird, ist die elementare Geschwindigkeit $c$ identisch mit der Geschwindigkeit, mit welcher sich die elektromagnetische Energie kräftefrei in einem materiefreien Raum bewegt. Weiter wird später angedeutet, daß die Kraft auf das Innere einer geschlossenen Fläche gleich der zeitlichen Änderung der Energieströmung durch die Fläche gesetzt werden kann. Die Kombination dieser Erfahrungen macht es verständlich, daß die wechselseitige Kraft relativ zueinander bewegter elektrischer Ladungen von der Geschwindigkeit abhängt, mit welcher die Energie in den Quantenfeldern strömt, mit welcher sich also die durch die relative Bewegung hervor-

gerufenen Spannungs- oder Deformationsdifferenzen von Volumen- zu Volumenelement ausgleichen können.

Die Wirkung, welche ein magnetisches Moment an verschiedenen Orten seiner Umgebung (magnetisches Feld) auf ein zweites Moment ausübt, läßt sich in der Weise beschreiben, daß man für einen jeden Punkt die Richtung, in welche sich die Achse des beobachtenden Momentes einstellt, und die Größe der Direktionskraft $\mathfrak{D}$ auf dasselbe für den Fall ergibt, daß $\frac{\mathfrak{M}}{c} = 1$ ist. Die so bestimmte Direktionskraft nennen wir magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$, diese ist also definiert durch die Gleichung

$$\mathfrak{D} = \mathfrak{H} \frac{\mathfrak{M}}{c}, \tag{18}$$

wobei $\mathfrak{M}$ in elektrischen Einheiten gemessen sein soll. Ist umgekehrt $\mathfrak{H}$ durch Beobachtung mit Hilfe eines bekannten magnetischen Momentes bekannt und wird die Direktionskraft $\mathfrak{D}$ auf ein anderes Moment ermittelt, so kann dessen Wert berechnet werden. Hierbei ist immer Voraussetzung, daß in dem ganzen von dem beobachtenden Moment eingenommenen Raum $\mathfrak{H}$ überall dieselbe Richtung und Größe habe, daß also das magnetische Feld in dem von $\mathfrak{M}$ eingenommenen Raum homogen sei.

Nachdem wir die Kraft zwischen bewegten Quantenaggregaten, als welche wir Stromkreise zu betrachten haben, ermittelt haben, gehen wir dazu über, zunächst extrapolatorisch die Kraft abzuleiten, welche ein einzelnes bewegtes Quantum in dem magnetischen Feld eines Quantenaggregats, also in einem endlichen magnetischen Feld, erfährt.

Es kann an einem Stromkreis immer nur die Direktionskraft $\mathfrak{D}$ auf den ganzen Kreis beobachtet werden. Um auf die Kraft $\mathfrak{K}_m$ auf einen Teil des Kreises von der Länge $dl$, dem Querschnitt $q$ und der Stromstärke $i$ zu kommen, wählen wir hypothetisch die Relation zwischen $\mathfrak{K}_m$, $\mathfrak{H}$, $dl$, $q$ und $i$ so, daß bei Summierung über den ganzen Stromkreis das experimentell begründete Integralgesetz $\mathfrak{D} = \mathfrak{H} \frac{\mathfrak{M}}{c}$ resultiert. Dies erreichen wir, wenn wir setzen

$$\mathfrak{K}_m = \mathfrak{H}\, dl\, \frac{i}{c}\,; \tag{19}$$

$\mathfrak{H}$ ist hierbei die Komponente der Feldstärke senkrecht zu $i$ und $dl$, $\mathfrak{K}_m$ steht senkrecht auf $\mathfrak{H}$ und $i$. Nun ist

$$i = qne(\mathfrak{v}_p + \mathfrak{v}_n) = qne\mathfrak{v};$$

ferner ist $q\,dl\,ne$ die ganze in dem Stromelement bewegte Ladung $E$. Es gilt darum die Relation

$$\mathfrak{K}_m = \mathfrak{H} q\, dl\, ne\, \frac{\mathfrak{v}}{c} = \mathfrak{H} E\, \frac{\mathfrak{v}}{c}. \tag{20}$$

Die Ladung $E$ setzt sich zusammen aus einzelnen Quanten von gleicher Ladung $e$ und hypothetischer gleicher mittlerer Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$. Wir schließen darum durch Extrapolation von dem endlichen Quantenaggregat, daß die magnetische Kraft, welche ein einzelnes Quantum $e$ in einem homogenen magnetischen Feld von der Stärke $\mathfrak{H}$ erfährt, durch die Gleichung gegeben wird:

$$\mathfrak{K}_m = \mathfrak{H} e\, \frac{\mathfrak{v}}{c}\,; \tag{21}$$

hierbei ist $\mathfrak{v}$ die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zu $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{K}_m$ steht senkrecht auf $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{v}$. Voraussetzung für die Gültigkeit dieses zunächst hypothetischen Quantengesetzes ist, daß $\mathfrak{v}$ und $\mathfrak{H}$ während der Beobachtung konstant sind und daß das magnetische Feld im Gebiete des Quantums homogen ist.

## § 10. Atomistische Struktur des magnetischen Mediums.

Gemäß dem Vorstehenden ist der Ausgangs- und der Angriffsort der magnetischen Kraft ein elektrischer Stromkreis; diesen selbst haben wir als ein Aggregat von geordnet bewegten elektrischen Quanten zu betrachten. Hieraus folgt, daß die elementaren Träger der magnetischen Kraft elektrische Quanten sind, welche relativ zueinander bewegt sind.

Die Erfahrung über der die zeitlich konstante magnetische Kraft, welche wir an endlichen Stromkreisen gemacht haben, können wir verallgemeinern und die Hypothese aufstellen, daß alle zeitlich konstanten magnetischen Felder als Träger im letzten Grunde elektrische Quanten haben, welche relativ zu

einem beobachtenden magnetischen Moment (Stromkreis) eine Bewegung besitzen. Diese verallgemeinernde Hypothese wenden wir zur Interpretation der nachstehenden Erfahrung an.

Bei der Beschreibung der magnetischen Wechselwirkung zwischen zwei Stromkreisen haben wir stillschweigend die Voraussetzung gemacht, daß der Raum zwischen ihnen nicht mit einem materiellen Medium erfüllt sei. Nunmehr wollen wir das Verhalten eines materiellen Mediums in einem Magnetfeld experimentell in folgender Weise untersuchen.

Wir stellen uns ein inhomogenes magnetisches Feld zwischen den kegelförmigen Polschuhen eines Elektromagneten her. In diesem Felde nimmt in einer Richtung senkrecht zur Verbindungslinie der Polschuhspitzen die Kraftliniendichte von innen nach außen ab; diese Verbindungslinie ist indes eine Symmetrieachse des inhomogenen magnetischen Feldes. In einem derartigen inhomogenen Feld bringen wir nun drehbar um den Mittelpunkt von dessen Symmetrieachse und um seinen eigenen Mittelpunkt ein zylindrisches Stäbchen aus einem Körper an, dessen Länge groß ist relativ zu seinem Durchmesser.

Die Untersuchung der materiellen Körper in dieser Weise ergibt, daß sie alle magnetisch sind, insofern die aus ihnen gemachten Stäbchen in dem Magnetfeld eine Direktionskraft erfahren. Und zwar ordnen sie sich in zwei Gruppen; die Körper der einen werden in Stäbchenform in eine Stellung parallel den magnetischen Kraftlinien gedreht, die Körper der zweiten Gruppe in eine Stellung normal zu den Kraftlinien. Die Körper der ersten Gruppe heißen darum paramagnetisch, diejenigen der zweiten diamagnetisch.

Die Direktionskraft auf ein para- oder ein diamagnetisches Stäbchen wird von seiten eines magnetischen Momentes (Stromkreis des Elektromagneten) ausgeübt. Daraus schließen wir, daß ein materielles Stäbchen im Magnetfeld selbst ein magnetisches Moment darstellt. Und zwar hat das in einem paramagnetischen Stäbchen auftretende magnetische Moment die gleiche Richtung wie das äußere Moment (Elektromagnet); darum wird das Stäbchen in

parallele Richtung zu dem äußeren Magnetfeld gedreht. Ein diamagnetisches Stäbchen nimmt in einem inhomogenen Magnetfeld ein zu diesem entgegengesetztes magnetisches Moment an; darum wird durch die wechselseitige Direktionskraft seine Längsachse aus der Richtung des äußeren Magnetfeldes heraus- und in die dazu normale Stellung gedreht.

Das magnetische Moment in einem diamagnetischen Körper sowohl wie in einem paramagnetischen hat nun nach der obigen Hypothese das Vorhandensein von Stromkreisen zur Voraussetzung, in welchen elektrische Quanten relativ zu einem anderen Moment in Bewegung begriffen sind.

Nachdem wir so zu der Folgerung vorgedrungen sind, daß in einem dia- oder paramagnetischen Körper Stromkreise mit einem magnetischen Moment vorhanden sind, haben wir zunächst die Frage nach der räumlichen Ausdehnung dieser Stromkreise experimentell zu beantworten. Untersuchen wir einen dia- oder paramagnetischen Körper, während er sich in einem konstanten magnetischen Feld befindet, darauf, ob zwischen zwei Punkten in endlicher Distanz in seinem Innern oder an seiner Oberfläche in irgendeiner Richtung relativ zur Richtung des Magnetfeldes eine elektrische Spannungsdifferenz vorhanden ist, wie es in einem Leitungsstrome der Fall ist, so finden wir ein negatives Resultat. Ebensowenig können wir in dem Körper, während er im magnetischen Feld ein magnetisches Moment besitzt, die Entwicklung von Wärme feststellen, wie sie in einem Leitungsstrome statthat. Hieraus schließen wir, daß die elektrischen Ströme im Innern eines dia- oder paramagnetischen Körpers in einem Magnetfeld keine Leitungsströme sein können, in welchen die bewegten elektrischen Quanten endliche Strecken zurücklegen und dabei im Zusammenstoß mit den Molekülen des Körpers Energie abgeben. Wir müssen vielmehr folgern, daß die Stromkreise in einem magnetischen Körper, welche in einem Magnetfeld sein magnetisches Moment liefern, innerhalb sehr kleiner Dimensionen oder innerhalb gewisser einzelner Individuen des materiellen Körpers lokalisiert sind und daß darum die in ihnen bewegten elektrischen

Quanten durch Zusammenstoß ihre Geschwindigkeit nicht verlieren, sondern innerhalb eines jeden Individuums eine konstante Stromstärke und darum ein konstantes magnetisches Moment besitzen. Aus diesem Grunde wollen wir ein derartiges einzelnes Moment ein magnetisches Elementarmoment nennen. Wir kommen so zu der Folgerung, daß sich das endliche magnetische Moment eines dia- oder paramagnetischen Körpers im Magnetfeld aus zahlreichen für sich existierenden magnetischen Elementarmomenten zusammenbaut. Es ist vielleicht nicht überflüssig, ausdrücklich zu bemerken, daß wir gemäß dem Vorstehenden sowohl für die para- wie für die diamagnetischen Körper die Existenz von widerstandslosen elementaren Stromkreisen in ihren Individuen zu folgern haben.

Es sei gleich hier die Frage nach dem Zusammenhang zwischen den elementaren Stromkreisen und den chemischen Atomen der materiellen Körper beantwortet, nachdem bereits oben die Hypothese der atomistischen Struktur der chemischen Materie eingeführt worden ist. Auf Grund der Erfahrung, daß Aggregate elementarer Stromkreise abgetrennt von chemischer Materie bis jetzt noch nicht nachgewiesen worden sind, machen wir die Annahme, daß die Individuen der materiellen Körper, in welchen widerstandslose Stromkreise lokalisiert sind, mit den chemischen Atomen identisch sind, daß also innerhalb der chemischen Atome elektrische Quanten in gewissen Bahnen ohne Zusammenstoß sich bewegen können.

Nun lehrt die Erfahrung, daß Stäbchen aus den meisten magnetischen Körpern außerhalb eines Magnetfeldes keine Direktionskraft aufeinander ausüben, daß sie also außerhalb eines endlichen Magnetfeldes kein endliches magnetisches Moment besitzen. Insofern das magnetische Moment von außen her durch ein endliches Magnetfeld in einem Körper hergestellt wird, nennen wir es induziert. Es erhebt sich von selbst die Frage, in welcher Weise das endliche magnetische Moment eines materiellen Körpers durch ein äußeres endliches Magnetfeld hervorgerufen wird.

Vor Beantwortung dieser Frage haben wir zu untersuchen, ob das Einbringen eines endlichen Leiterkreises in ein Magnetfeld oder allgemeiner der Vorgang des Hindurchtretens von magnetischen Kraftlinien oder, quantitativ, eines magnetischen Kraftflusses

$$F_m = \int\limits_{\text{Kreisfläche}} \mathfrak{H}_n \, df$$

durch die von einem Leiterkreis umrandete Fläche eine ponderomotorische Wirkung auf die Ionen und somit einen elektrischen Strom in dem Leiterkreis hervorruft. Die experimentelle Untersuchung dieser Frage liefert folgende Resultate.

Tritt durch die Fläche eines Leiterkreises der magnetische Kraftfluß $F_m$ ein oder aus, so wird längs des Kreises eine elektromotorische Kraft $\left(\int\limits_{\text{Kreis}} \mathfrak{E}_e \, dl\right)$ auf die elektrischen Quanten induziert, deren zeitliche Summe während der Zeitdauer der Änderung von $F_m$ gleich ist $\frac{F_m}{c}$. Während dieser Zeit erhält also die Einheit der elektrischen Ladung in dem Leiterkreis einen Bewegungsantrieb oder Impuls (Kraft $\times$ Zeit). Es kann sich darum in dem Leiterkreis eine elektrische Strömung infolge der Änderung des magnetischen Kraftflusses durch den Leiterkreis herstellen. Wie groß die Stärke dieser Strömung ist, hängt außer von der elektromotorischen Kraft $\frac{d}{dt}\left(\frac{F_m}{c}\right)$ und ihrer Zeitdauer noch ab von der Menge frei beweglicher elektrischer Ladung, ferner von dem Ohmschen Widerstand in dem Leiterkreis. Sie ist um so kleiner, je größer dieser ist; durch ihn wird offenbar die Bewegungsgröße, welche die frei beweglichen Quanten durch die relative Bewegung des magnetischen Kraftflusses gewonnen haben, ihnen wieder genommen, so daß die induzierte elektrische Strömung nach kurzer Zeit wieder erlischt. Könnten wir mit einem endlichen Stromkreis operieren, dessen Widerstand Null ist, so würde die durch die Bewegung des magnetischen Kraftflusses durch seine Fläche in ihm hervorgerufene elektrische Strömung in unverminderter Stärke dauernd fortbestehen und würde sich so lange nicht mehr ändern, als sich der magnetische Kraftfluß durch den Kreis nicht ändert.

Nun haben wir zwar keine endlichen Stromkreise, wohl aber in den chemischen Atomen jene elementaren Stromkreise, in denen der Widerstand Null ist, in denen also durch die Strömung keine Wärme aus der Energie der bewegten Quanten infolge von Zusammenstößen geschaffen wird.

Aus der Erfahrung der Induktion einer elektromotorischen Kraft bez. einer Stromstärke in einem endlichen Leiterkreis infolge der Änderung eines magnetischen Kraftflusses durch ihn einerseits, aus der obigen Folgerung widerstandsloser elementarer Stromkreise in materiellen Körpern andererseits ziehen wir den Schluß, daß *die Herstellung eines magnetischen Feldes* (Einströmen eines magnetischen Kraftflusses) *in einem materiellen Körper die Induktion einer Stromstärke und somit eines magnetischen Momentes in den einzelnen elementaren Stromkreisen zur Folge hat*; das Zusammenwirken der induzierten elementaren magnetischen Momente liefert dann ohne weiteres ein beobachtbares endliches magnetisches Moment. Ein magnetisches Moment, das einen solchen Ursprung hat, nennen wir *erzeugt*.

Wichtig ist nun für das Weitere die Frage, welche *Richtung* das in einem Stromkreis durch ein Magnetfeld *erzeugte magnetische Moment* relativ zu diesem hat. Lassen wir durch die Fläche eines endlichen Leiterkreises einen magnetischen Kraftfluß von seiten eines magnetischen Momentes eintreten, so hat das magnetische Moment des dadurch im Kreis induzierten elektrischen Stromes eine Richtung, welche entgegengesetzt ist derjenigen des induzierenden magnetischen Momentes. Das induzierende Moment und das erzeugte Moment haben also entgegengesetzte Richtung. Sind darum die Achsen der beiden Momente um einen kleinen Winkel gegeneinander geneigt, so sucht die zwischen ihnen wirksame Direktionskraft das erzeugte Moment so zu drehen, daß es der diametralen Stellung relativ zur Richtung des induzierenden Magnetfeldes zustrebt. Tritt der magnetische Kraftfluß wieder aus der Fläche des Stromkreises heraus, so ist der Impuls auf die gesamte dadurch in Bewegung gesetzte elektrische Ladung

entgegengesetzt gleich groß dem Impuls während des Eintritts des Kraftflusses.

Dieses an einem endlichen Leiterkreis erhaltene Resultat haben wir nun auf die elementaren widerstandslosen Stromkreise in den chemischen Atomen der dia- und paramagnetischen Körper anzuwenden. Wird ein Stäbchen aus einem materiellen Körper in ein Magnetfeld in geringer Neigung gegen dessen Richtung gebracht oder von außen her das Magnetfeld in dem Stäbchen hergestellt, so erhalten die in den elementaren Stromkreisen der Körperatome beweglichen elektrischen Quanten alle einen Impuls, welcher eine Geschwindigkeitsänderung und ein dieser entsprechendes magnetisches Moment zur Folge hat. Da innerhalb der elementaren Stromkreise kein Widerstand vorhanden ist, so bleiben die erzeugten magnetischen Elementarmomente so lange bestehen, als der äußere Kraftfluß, der sie erzeugte, unverändert durch sie hindurchgeht. Aus ihnen baut sich das endliche erzeugte magnetische Moment des Stäbchens zusammen. Dieses hat wie jedes einzelne induzierte Elementarmoment gemäß dem Obigen eine dem induzierenden Moment entgegengesetzte Richtung. Wird das äußere magnetische Feld aus dem materiellen Körper fortgenommen, so verschwindet infolge des damit verbundenen nunmehr umgekehrten Impulses auf die Quanten der elementaren Stromkreise das erzeugte magnetische Moment aus dem Stäbchen.

Da nach dem Obigen sowohl in dia- wie in paramagnetischen Körpern widerstandslose elementare Stromkreise vorhanden sind, so gilt die vorstehende Folgerung für die beiden Arten von Körpern.

Beschränkt sich nun die Wirkung des äußeren Magnetfeldes in einem materiellen Körper auf die Erzeugung eines magnetischen Momentes infolge der Herstellung eines magnetischen Kraftflusses durch den Körper, dann muß ein aus ihm gemachtes Stäbchen sich normal zu der Symmetrieachse des äußeren inhomogenen Magnetfeldes stellen, da das erzeugte Moment entgegengesetzt zu dem induzierenden Moment gerichtet ist. Dies ist nun, wie wir oben sahen, in der Tat bei den diamagnetischen Körpern der Fall. Es ist darum

wahrscheinlich, daß der Diamagnetismus materieller Körper ausschließlich darauf zurückzuführen ist, daß in den elementaren Stromkreisen der chemischen Atome infolge des Einströmens eines äußeren magnetischen Kraftflusses magnetische Elementarmomente erzeugt werden.

Da das magnetische Moment, das in paramagnetischen Körpern in einem Magnetfeld sich herstellt, die gleiche Richtung wie das äußere induzierende Moment besitzt, so muß neben der Erzeugung eines entgegengesetzten Momentes infolge des Einströmens eines magnetischen Kraftflusses in den Körper noch eine andere Wirkung des äußeren Momentes stattfinden. Und zwar muß diese Wirkung ein gleichgerichtetes magnetisches Moment in dem Körper herstellen, welches größer ist als das erzeugte entgegengesetzte Moment.

Über diese neue Wirkung nehmen wir folgende Hypothese an. In den Atomen paramagnetischer Körper sind unabhängig von einem äußeren Magnetfeld magnetische Elementarmomente lokalisiert; bei Abwesenheit eines endlichen äußeren Feldes sind, wenigstens in einem schwach paramagnetischen Körper, die Elementarmomente der Atome relativ zueinander ungeordnet orientiert; aus ihrem Zusammenwirken resultiert darum kein endliches magnetisches Moment nach außen; wird dagegen in dem Körper von außen her ein endliches Magnetfeld hergestellt, so ordnet dies dank der Direktionskraft auf die bereits vorhandenen Elementarmomente einen Teil derselben in seine Richtung, und dieser gerichtete Teil der zuvor ungeordneten Elementarmomente liefert ein endliches magnetisches Moment von gleicher Richtung wie das äußere Moment. Das auf diese Weise hergestellte magnetische Moment sei geordnet genannt zum Unterschied von dem erzeugten.

Die vorstehende Hypothese über den Paramagnetismus gewinnt durch die Erfahrung an Wahrscheinlichkeit, daß es stark paramagnetische Körper gibt — sie werden nach dem wichtigsten Vertreter dieser Art ferromagnetisch genannt —, in welchen das durch ein äußeres Magnetfeld induzierte Moment nach dessen

Fortnahme zu einem Teile zurückbleibt, so daß ein endlicher permanenter Magnet entsteht.

Gemäß dem Vorstehenden haben wir das in einem Körper von einem Magnetfeld induzierte magnetische Moment im allgemeinen als eine Summe aus zwei Momenten zu betrachten; von diesen hat das eine, das erzeugte Moment, entgegengesetzte Richtung, das andere, das geordnete Moment, gleiche Richtung relativ zu dem äußeren induzierenden Feld. Je nachdem in dieser Summe das eine oder das andere Glied größer ist, verhält sich der materielle Körper dia- oder paramagnetisch.

Nachdem die atomistische Struktur des magnetischen materiellen Mediums in quantitativer Hinsicht bis zu einem gewissen Grade analysiert ist, sei noch für quantitative Messungen eine magnetische Mediumkonstante definiert. Zu diesem Zweck benutzen wir zwei gleiche zylindrische Drahtspulen, deren Länge sehr groß ist im Verhältnis zu ihrem Durchmesser. In dem Innern der einen Spule befinde sich kein materielles Medium. Das Innere der anderen sei mit einem Zylinder aus einem para- oder diamagnetischen Medium ausgefüllt; dieser sei indes in seiner Mitte normal zu seiner Achse durch eine schmale planparallele materiefreie Schicht in zwei Hälften zertrennt. Jede der zwei Spulen werde mit derselben Stromstärke beschickt. Bestimmt wird mit Hilfe eines kleinen magnetischen Momentes von bekannter Größe (Stromkreis) die magnetische Feldstärke einmal in der Spule ohne materiellen Kern — sie sei $\mathfrak{H}$ —, sodann in der zweiten Spule zwischen den zwei Hälften des materiellen Kernes — sie sei $\mathfrak{H}_m$. Die Differenz $\mathfrak{H}_m - \mathfrak{H}$ stellt dann den magnetischen Kraftfluß durch die Flächeneinheit dar, welcher von der äußeren magnetischen Feldstärke $\mathfrak{H}$ in dem materiellen Medium induziert wird. Wie nun die Beobachtung lehrt, ändert sich dieser induzierte Kraftfluß mit $\mathfrak{H}$, und zwar ist jene Differenz bei einer großen Anzahl von Körpern proportional $\mathfrak{H}$, so daß gesetzt werden kann

$$\mathfrak{H}_m - \mathfrak{H} = 4\pi\varkappa\mathfrak{H}$$

oder



$$\mathfrak{H}_m = (1 + 4\pi\varkappa)\,\mathfrak{H} = \mu\,\mathfrak{H}. \tag{22}$$

Die Größe $\varkappa$ in dieser Relation heißt magnetische Suszeptibilität, die Größe $\mu$ magnetische Permeabilität. Die eine und somit auch die andere ist bei den diamagnetischen und bei den meisten paramagnetischen Körpern unabhängig von der äußeren Feldstärke $\mathfrak{H}$, bei den stark paramagnetischen oder ferromagnetischen Körpern eine Funktion von $\mathfrak{H}$. $\varkappa$ hat bei den paramagnetischen Körpern positives, bei den diamagnetischen negatives Vorzeichen.

Auf Grund ganz analoger Erwägungen, wie sie oben für die Dielektrizitätskonstante angestellt wurden, läßt sich zeigen, daß die vorstehende Definition und Messung der magnetischen Mediumkonstanten $\mu$ ihre Anwendbarkeit für solche magnetische Felder verliert, deren Homogenitätsbereich von der Ordnung des Volumens der magnetischen Elementarmomente oder kleiner ist, ferner für solche Felder, deren Zeitdauer kleiner als die Zeit ist, welche die Ordnung der Elementarmomente in Anspruch nimmt. Diese Voraussetzungen sind im allgemeinen für oszillatorische elektromagnetische Felder, deren Frequenzen größer als $10^{14}$ sec$^{-1}$ sind, nicht mehr erfüllt. Die Maxwellschen Mediumsgleichungen verlieren darum auch aus diesem Grunde im Gebiete großer Frequenzen ihre Gültigkeit.

Da oben bei der qualitativen Analyse des magnetischen Mediums von dem induzierten magnetischen Moment die Rede war, so mag es Interesse bieten, die magnetische Mediumkonstante in Zusammenhang mit jenem Begriff zu bringen. Dies wird dadurch möglich, daß das endliche magnetische Moment, das von einem homogenen Magnetfeld in einem materiellen Stäbchen vom Querschnitt Eins induziert wird, für die Längeneinheit verglichen wird mit dem magnetischen Moment der Längeneinheit einer langen Stromspule vom Querschnitt Eins. Ist die Zahl von deren Windungen auf der Längeneinheit $z$ cm$^{-1}$, die Stromstärke in ihr $i$, so ist das magnetische Moment der Längeneinheit gleich $z\,i$ in statischem Maß; der magnetische Kraftfluß durch den Querschnitt der Spule,

also die magnetische Feldstärke beträgt $4\pi \frac{zi}{c}$, wie die Beobachtung an der Spule direkt ergibt oder wie aus anderen Erfahrungen über das magnetische Feld endlicher Stromkreise zu folgern ist. Da nun der induzierte magnetische Kraftfluß durch die Querschnittseinheit des materiellen Mediums gleich $4\pi\varkappa\mathfrak{H}$ ist und die beiden Momente geometrisch gleich sind, so ist $c\varkappa\mathfrak{H}$ als das pro Längen- und Querschnitts-, also pro Volumeneinheit induzierte magnetische Moment in statischem Maß anzusprechen.

Man kann versucht sein, aus der Mediumkonstante $\varkappa$ eine magnetische Atomkonstante abzuleiten, indem man $\varkappa$ mit der Zahl der materiellen Individuen (Atome, Moleküle) in der Volumeneinheit dividiert. Indes läßt sich leicht klar machen, daß mit einer solchen Rechnung wenig gewonnen wird. Die magnetische Suszeptibilität $\varkappa$ stellt zunächst bereits eine Summe aus zwei verschiedenartigen magnetischen Momenten, dem erzeugten und geordneten, dar. Bei den paramagnetischen Körpern gibt $\varkappa$ nur einen Bruchteil der permanenten Elementarmomente oder nur diejenigen Komponenten aller Elementarmomente, welche in die Richtung des induzierenden endlichen Momentes fallen. Daß sich die Elementarmomente in ihrer ganzen Größe und Zahl in dessen Richtung drehen, wird durch die desorientierenden Stöße infolge des thermodynamischen Zustandes oder durch Kräfte anderer Art, so vor allem durch die wechselseitigen elektrischen Kräfte zwischen den Atomen eines materiellen Körpers verhindert; $\varkappa$ ist darum bei den paramagnetischen Körpern als Mediumkonstante eine Funktion der Temperatur und ändert sich mit der physikalischen und chemischen Phase.

Ferner muß man mit der Möglichkeit rechnen, daß in dem einzelnen chemischen Atom eines materiellen Körpers gleichzeitig mehrere elementare Stromkreise vorkommen und in fester relativer Orientierung miteinander gekoppelt sind. Sie haben dann alle für sich ein permanentes magnetisches Moment; wie groß indes das aus ihrer festen Koppelung resultierende Moment ist, hängt von ihrer relativen Orientierung ab. Es ist aus diesem Grunde

möglich, daß das resultierende permanente Atommoment sehr klein ist und darum von dem Moment überwogen wird, das in den gekoppelten elementaren Stromkreisen von einem äußeren Magnetfeld erzeugt wird und in allen gleichgerichtet ist.

Die vorstehende Überlegung und die Unterscheidung zwischen magnetischem Elementarmoment und Atommoment, das aus mehreren relativ fest orientierten Elementarmomenten resultiert, läßt auch die Annahme überflüssig erscheinen, daß zwischen den chemischen Atomen der diamagnetischen und denjenigen der paramagnetischen Körper ein prinzipieller Unterschied existiert. Es ist wahrscheinlich, daß sie sich nur durch die relative Orientierung der in dem einzelnen Atom zusammengekoppelten Elementarmomente unterscheiden. Ja gerade die Existenz der zwei Arten magnetischer Körper ist eine Stütze für die Vermutung, daß in dem Atom eines materiellen Körpers im allgemeinen mehrere elementare Stromkreise vorkommen, deren relative Orientierung von einer Atomart zur andern variiert.

Zum Schlusse dieses Abschnittes seien die Aufschlüsse und Vermutungen zusammengestellt, zu welchen uns die atomistische Analyse des magnetischen materiellen Mediums geführt hat. Ziemlich sicher ist, daß in den chemischen Atomen elementare Stromkreise vorkommen, in welchen elektrische Quanten einem Bewegungsimpuls folgen können; die Bewegung der elektrischen Quanten in diesen elementaren Stromkreisen begegnet keinem Widerstand durch Zusammenstöße, ihre kinetische Energie verschwindet also nicht in die Form der thermischen Energie. In den Atomen der paramagnetischen Körper ist unabhängig von einem äußeren Impuls eine Bewegung der elektrischen Quanten in den elementaren Kreisen bereits in gewisser Stärke vorhanden; sie besitzen darum ein permanentes magnetisches Moment. Vermutlich kommen in dem Atom eines paramagnetischen Körpers mehrere permanente magnetische Elementarmomente vor. Das gleiche dürfte bei dem Atom eines diamagnetischen Körpers mit der Modifikation der Fall sein, daß die zusammengekoppelten

Elementarmomente ein sehr kleines resultierendes Atommoment liefern.

Gemäß dem Vorstehenden besitzen die chemischen Atome im allgemeinen nicht allein überhaupt ein permanentes magnetisches Feld, sondern dessen Struktur ist vielleicht durch das gleichzeitige Vorkommen mehrerer Elementarmomente relativ kompliziert. Zu einem analogen Resultat führte uns die atomistische Analyse des dielektrischen Mediums hinsichtlich des elektrischen Feldes; es ergab sich, daß an einem chemischen Atom infolge der gleichzeitigen Anwesenheit positiver und negativer elektrischer Quanten elementare elektrische Felder vorkommen. Ob die elektrischen und die magnetischen Felder der chemischen Atome in einem Zusammenhang stehen, welches im speziellen die Struktur des elektrischen und des magnetischen Feldes einer jeden chemischen Atomart ist, welche Relationen zwischen den gleichartigen und ungleichartigen Atomen hieraus folgen, die Beantwortung dieser Fragen muß einer besonderen Schrift über das chemische Atom vorbehalten bleiben.

---

III. Kapitel.

# Die Masse der freien elektrischen Quanten.

## § 11. Masse des Elektrons.

Nachdem die reale Existenz von elektrischen Elementarquanten festgestellt ist, erhebt sich zunächst die weitere Frage, welche Masse mit dem einzelnen Elementarquantum verknüpft ist. Als Masse definieren wir in Übereinstimmung mit der Newtonschen Mechanik das Verhältnis der an einem Körper (Elementarquantum) angreifenden Kraft $\mathfrak{K}$ zu der von ihr hervorgebrachten Beschleunigung $\frac{d\mathfrak{v}}{dt}$. Wir machen indes hierbei zunächst die Voraussetzung, daß die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ des Elementarquantums, wenn es der Einwirkung der Kraft unterworfen wird, sehr klein sei, verglichen mit der Geschwindigkeit $c$ des Lichtes; wir beziehen also die Masse $m$ zunächst auf den Wert $\frac{\mathfrak{v}}{c} = 0$, und betrachten sie (ruhende Masse), wie es in der Newtonschen Mechanik geschieht, als Konstante.

Um gemäß der Methode der Atomdynamik einen Schluß auf die Masse des einzelnen Elementarquantums ziehen zu können, müssen wir eine große Anzahl gleichartiger Quanten von dem gleichen Ort aus in derselben Richtung in Bewegung setzen und die Richtung ihrer Geschwindigkeit dadurch festlegen, daß wir sie auf einen Schirm auffallen lassen, auf dem sie ihre Auftreffstelle, z. B. durch Emission von Licht oder durch eine photographische Wirkung markieren. Diese Aufgabe lösen wir für die negativen Elementarquanten in der Weise, daß wir an einer Metallplatte durch ultra-

violette Bestrahlung oder durch auftreffende positive Strahlen (§ 13) negative Quanten von relativ kleiner Geschwindigkeit zur Emission bringen, zwischen die Metallplatte (Kathode) und eine zweite mit einem Diaphragma versehene Metallplatte (Anode) eine Spannungsdifferenz $V$ (stat. Einh.) legen und durch beträchtliche Verdünnung des Gases zwischen den zwei Platten dafür sorgen, daß die zwischen ihnen von dem elektrischen Feld beschleunigten negativen Quanten zum größten Teile nicht mit Gasteilchen zusammenstoßen und somit an diese keine Energie abgeben. Unter diesen Voraussetzungen ist dann die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}_x$ in irgendeinem Punkte zwischen den Metallplatten gleich dem Gefälle der Spannung $V$ in der Richtung $x$ (Kathode—Anode), also $\mathfrak{E}_x = -\frac{dV}{dx}$, die elektrische Kraft auf das einzelne negative Quantum somit $e\mathfrak{E}_x = e\frac{dV}{dx}$. Es gilt dann die Gleichung

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = e\frac{dV}{dx}. \tag{23}$$

Aus dieser folgt durch eine Umformung bzw. darauffolgende Integration zwischen den zwei Platten

$$\frac{1}{2}md\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = e\,dV,$$

bzw.

$$\frac{1}{2}m\left[\left(\frac{dx_2}{dt}\right)^2 - \left(\frac{dx_1}{dt}\right)^2\right] = e(V_2 - V_1) = eV.$$

Nehmen wir an, daß die Anfangsgeschwindigkeit $\frac{dx_1}{dt}$ der negativen Quanten an der Kathodenoberfläche klein ist gegen die Endgeschwindigkeit $\frac{dx_2}{dt}$ an der Anodenoberfläche beim Durchtritt durch das Diaphragma und setzen wir $\frac{dx_2}{dt} = \mathfrak{v}$ und somit $\frac{dy_2}{dt} = \frac{dz_2}{dt} = 0$, dann ergibt sich die Gleichung

$$\frac{1}{2}m\mathfrak{v}^2 = eV. \tag{24}$$

Diese besagt, daß jedes einzelne negative Quantum, nachdem es die Spannungsdifferenz $V$ frei ohne Zusammenstoß durchlaufen hat, am Ende derselben eine kinetische Energie besitzt, welche gleich ist der an ihm geleisteten elektrischen Arbeit $eV$. Indem wir von der Kathode nicht bloß ein negatives Quantum, sondern mehrere Quanten, und nicht bloß in einem Moment, sondern während der ganzen Beobachtungsdauer ausgehen lassen, erhalten wir zwischen Kathode und Anode einen Strom negativer Quanten, welche alle mit der gleichen kinetischen Energie an der Anode eintreffen. Lassen wir ihn ganz oder zum Teil durch das Diaphragma hinter die Anode in einen kraftfreien, hoch evakuierten Gasraum austreten, so beachten wir, daß der Strom negativer Quanten geradlinig, wie wir es bei einem Strahl annehmen, verläuft. Aus diesem Grunde wurde der Strom negativer Quanten von gleicher Geschwindigkeitsrichtung ein Bündel negativer Strahlen oder mit Rücksicht auf seinen Ursprung ein Bündel Kathodenstrahlen genannt, das einzelne Quantum in dem Bündel Einzelstrahl oder Kathodenstrahlteilchen.

Die vorstehende Methode, negative Strahlen künstlich zu erzeugen, indem man negative Quanten eine bestimmte Spannungsdifferenz frei durchlaufen läßt, kann man offenbar auch auf positive Quanten anwenden und so positiv elektrische Strahlen von bestimmter kinetischer Energie herstellen.

Die Herstellung eines Bündels elektrischer Strahlen, die in großer Zahl hintereinander in derselben Richtung laufen und eine beträchtliche kinetische Energie besitzen, hat in erster Linie den Zweck, an den negativen Quanten so viel Energie zur Entwicklung zu bringen, daß sie durch deren Abgabe an der Auftreffstelle auf einem Schirm für unsere Beobachtungsmethode bemerkbar werden. An einem derartigen Strahlenbündel, in dem das einzelne Quantum die durch $eV$ gemessene kinetische Energie besitzt, können wir nunmehr Beobachtungen über die Masse der Strahlenteilchen anstellen, indem wir sie transversal zu ihrer anfänglichen Bewegungsrichtung ($x$) beschleunigen und somit aus dieser, z. B. in der Richtung $y$, um eine gewisse Strecke auf dem

beobachtenden Schirm ablenken. Dies erreichen wir, indem wir das Strahlenbündel längs einer gewissen Strecke ($x_3 - x_2 = s$) in einem homogenen magnetischen Feld (vgl. § 9) von der Stärke $\mathfrak{H}_z = \mathfrak{H}$, $\mathfrak{H}_y = \mathfrak{H}_x = 0$ verlaufen lassen; die Strecke $x_3 - x_2 = s$ soll sich, wie wir der Einfachheit wegen annehmen, von dem Diaphragma in der Anode ($x_2$) bis zum Schirm ($x_3$) erstrecken. Es wird dann in einer Richtung, welche senkrecht auf $\mathfrak{v}$ und auf $\mathfrak{H}$ steht, eine Kraft auf das einzelne Quantum ausgeübt, welche gleich ist $e\mathfrak{v}\frac{\mathfrak{H}}{c}$ (vgl. § 9). Das Quantum bewegt sich darum in dem homogenen Magnetfeld auf einem Kreise, der senkrecht auf der Richtung von $\mathfrak{H}$ steht und dessen Radius sich aus der Bedingung bestimmt, daß die Zentrifugalkraft auf das einzelne Quantum $\frac{m\mathfrak{v}^2}{r}$ gleich ist der ablenkenden Zentralkraft $\frac{e\mathfrak{v}\mathfrak{H}}{c}$. Es gilt demnach die Gleichung

$$\frac{e\mathfrak{v}\mathfrak{H}}{c} = \frac{m\mathfrak{v}^2}{r}$$

oder

$$\mathfrak{H} r = c\frac{m}{e}\mathfrak{v}. \tag{25}$$

Aus der Größe von $r$ berechnet sich die magnetische Ablenkung $(y_2 - y_1) = a_m$, welche das einzelne Quantum längs der Strecke ($s$) erfährt. Es ist nämlich, wie eine einfache geometrische Überlegung ergibt:

$$r = \frac{a_m{}^2 + s^2}{2\,a_m}.$$

Durch Einsetzen in Gleichung (25) folgt:

$$\mathfrak{H}\frac{a_m{}^2 + s^2}{2\,a_m} = c\frac{m}{e}\mathfrak{v}.$$

Mit dieser Gleichung kombinieren wir die Gleichung, welche uns die kinetische Energie des Strahlenlichtes lieferte:

$$\frac{1}{2}m\mathfrak{v}^2 = eV \text{ oder } \frac{1}{2}\frac{m}{e}\mathfrak{v}^2 = V.$$

In den zwei vorstehenden Gleichungen sind die Größen $V$, $\mathfrak{H}$, $a_m$, $s$ durch die messende Beobachtung bekannt, es können also aus

ihnen die Werte von $\frac{m}{e}$ und $\mathfrak{v}$ berechnet werden.

Die vorstehende Methode, $\frac{m}{e}$ und $\mathfrak{v}$ der Kathodenstrahlen zu bestimmen, ist zuerst von A. Schuster[1]) angegeben worden. E. Wiechert[2]) und J. J. Thomson[3]) haben nach ihr oder nach ähnlichen Methoden die ersten angenäherten Bestimmungen von $\frac{m}{e}$ ausgeführt. Später sind derartige Bestimmungen mit gesteigerter Genauigkeit von zahlreichen Autoren ausgeführt worden.

Als erstes Resultat der Untersuchungen über die Masse der Kathodenstrahlteilchen ergab sich, daß alle Kathodenstrahlen von gleicher kinetischer Energie, soweit überhaupt die Genauigkeit der Beobachtungen reicht, genau gleiche Masse $m$ besitzen. Dies Resultat folgt allein aus der Beobachtung, daß der Auftrefffleck von Kathodenstrahlen, welche von der gleichen Spannungsdifferenz $V$ erzeugt wurden, sich nicht vergrößert, wenn die Strahlen magnetisch abgelenkt werden; dies müßte nämlich gemäß Gleichung (25) der Fall sein, wenn in dem Kathodenstrahlbündel negative Quanten von zwar gleicher Ladung und gleicher kinetischer Energie, aber von verschiedener Masse enthalten wären. Bei den Quanten der negativen Strahlen ist demnach die Gleichheit der elektrischen Einzelladungen von einer Gleichheit der an sie gebundenen Einzelmassen begleitet.

Als zweites Resultat wurde festgestellt, daß $\frac{m}{e}$ den Wert $1{,}9 \cdot 10^{-18}$ in elektrostat. Maß besitzt, die Dimension von $\frac{m}{e}$ ist demnach $g^{1/2}\ cm^{-3/2}\ sec$. Um aus ihm $m$ berechnen zu können, müssen wir den Wert der Ladung $e$ des einzelnen Strahlungsquantums kennen. Nun hat es zwar kein Bedenken, die Ladung

---

1) A. Schuster, Proc. Roy. Soc. **37**, 317, 1884; **47**, 526, 1890; Wied. Ann. **65**, 877, 1898.

2) E. Wiechert, Abh. phys.-ökon. Ges. Königsberg **38**, 1, 1897.

3) J. J. Thomson, Phil. Mag. **44**, 293, 1897; **48**, 547, 1899.

des Strahlungsquantums, wenn es ruht, gleich dem oben bestimmten Elementarquantum der Elektrizität $e = 4{,}7 \cdot 10^{-10}$ stat. Einh. zu setzen. Da indes die elektrische Ladung zunächst nur für den Fall, daß sie relativ zum Beobachter ruht, definiert und bestimmt wurde, so ist zu fragen, ob sie für einen relativ zu ihr bewegten Beobachter den gleichen Wert besitzt, unabhängig von ihrer Relativgeschwindigkeit. Nun ist nach dem Relativitätsprinzip[1]) die elektrische Ladung in der Tat unabhängig von einer konstanten Translationsgeschwindigkeit relativ zu einem Beobachter, und dieses Prinzip scheint durch die Erfahrung als richtig erwiesen zu werden. Indes ist bei den vorstehenden Beobachtungen über die elektrische und die magnetische Kraft auf ein bewegtes negatives Quantum die Geschwindigkeit relativ zu Punkten im endlichen magnetischen oder elektrischen Feld nicht konstant, es ist vielmehr eine relative, allerdings konstante Beschleunigung vorhanden. Ob auch unter diesem Umstand die elektrische Ladung als konstant zu betrachten ist, wissen wir nicht. Freilich wird diese Frage von den meisten Autoren in der Regel gar nicht aufgeworfen, und es wird das elektrische Elementarquantum als eine von allen Umständen unabhängige Konstante betrachtet. Wir dürfen uns aber nicht verhehlen, daß eine zuverlässige Antwort auf jene Frage aussteht. Und wenn im folgenden zur Berechnung von $m$ der Wert der ruhenden Ladung von $e$ eingeführt wird, so geschieht dies mit allem Vorbehalt einer bewußten Hypothese.

Aus der Kombination dieses Wertes mit dem oben ermittelten Werte von $\frac{m}{e}$ berechnet sich darum für die ruhende Masse des Quantums der negativen Strahlen der Wert $m = 8{,}9 \cdot 10^{-28}$ g. Diese Masse ist rund tausendmal kleiner als die kleinste Atommasse in der Chemie, nämlich diejenige des Wasserstoffatoms (vgl. § 12); die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen ergeben sich demnach $10^4$ bis $10^6$mal größer als diejenige, welche man bei

---

1) Vergl. A. Einstein, Jahrb. d. Rad. u. El. **4**, 411, 1907.

mäßigen Temperaturen im Mittel den Atomen und Molekülen der Chemie zuzuschreiben hat. E. Wiechert und J. J. Thomson waren die ersten Physiker, welche den Mut hatten, sich zu diesen quantitativen Konsequenzen ihrer Auffassung von den Kathodenstrahlen zu bekennen.

Man hat sich daran gewöhnt, ein negatives Elementarquantum, welches die Ladung $-4{,}7 \cdot 10^{-10}\, g^{1/2}\, cm^{3/2}\, sec^{-1}$ und die ruhende Masse $m = 8{,}9 \cdot 10^{-28}$ g besitzt, als negatives Elektron zu bezeichnen. Da bis jetzt keine positiven Quanten von gleich kleiner Masse, also „positive Elektronen", experimentell nachgewiesen werden konnten, so soll im folgenden unter Elektron immer das negative Elektron von vorstehender Charakteristik verstanden werden.

Gegenüber der als selbstverständlich verbreiteten Meinung, daß die spez. Ladung $\frac{e}{m}$ des Elektrons eine von allen Umständen unabhängige Konstante sei, ist es am Platze, auf mögliche Einschränkungen hinzuweisen. Es ist nicht zu vergessen, daß nach den obigen Methoden die spez. Ladung nur für das frei für sich bewegte Elektron bestimmt wurde. Jedenfalls sind die wechselseitigen Kräfte der Elektronen, welche in einem Strahlenbündel von geringer Stromstärke neben oder hintereinander laufen, klein relativ zu den Kräften von seiten des äußeren elektrischen oder magnetischen Feldes. Dies folgt aus einer schätzenden Rechnung und auch aus der Tatsache, daß Strahlenbündel von konstantem Querschnitt auf relativ langen Strecken sich realisieren lassen. Ob indes die Elektronen, nicht bloß in dem Zustand des freien Strahles, sondern auch innerhalb des Atomverbandes, dieselbe spez. Ladung besitzen, erscheint fraglich. Daß die spez. Ladung, insofern sie die Masse enthält, eine Funktion der Translationsgeschwindigkeit relativ zum Beobachter ist, wird weiter unten dargelegt und sei der Vollständigkeit halber bereits hier erwähnt.

Wie man von vornherein erwarten darf, ist nicht mit jedem frei beweglichen negativen Quantum die oben berechnete kleine Masse des Elektrons verknüpft, welche untrennbar mit ihm verknüpft ist. Vielmehr kann sich an ein abgetrenntes Elektron auch

die Masse eines oder mehrerer neutraler chemischer Atome anlagern, und so ein negatives Quantum liefern, das zwar immer noch freilich beweglich, aber nunmehr mit einer relativ großen fremden Masse beladen ist. Dieser Fall liegt in der Tat vor bei den negativen Ionen in dichten Gasen von nicht hoher Temperatur, wie aus dem kleinen Wert ihrer spez. Geschwindigkeit zu folgern ist; er liegt ferner vor bei den negativen Ionen elektrolytischer Leiter, wie aus dem Transport chemischer Atome oder Radikale durch die negativen Quanten in diesem Falle zu schließen ist. Dagegen sind in verdünnten Gasen, in dichten Gasen von hoher Temperatur (Flammengase) und in den metallischen Leitern die negativen Ionen zum großen Teile oder während eines beträchtlichen Teiles der Zeit ihrer ungebundenen Existenz Elektronen von kleiner Masse.

Oben wurde bereits die Hypothese eingeführt, daß die positiven und die negativen elektrischen Quanten Bestandteile der chemischen Atome seien. Nun hat die chemische Analyse materieller Körper eine Anzahl verschiedener Atomarten festgestellt. Die Kombination dieser Erfahrung mit jener Hypothese legt uns die Frage vor, ob die in verschiedenen chemischen Atomen vorkommenden negativen Quanten Elektronen von identischer Natur seien.

Diese Frage kann zunächst experimentell für diejenigen negativen Quanten beantwortet werden, welche von den chemischen Atomen abgetrennt und durch Beschleunigung in einem elektrischen Feld zu negativen Strahlen gemacht werden können. Die Untersuchung der negativen Strahlen, welche auf diese Weise aus verschiedenen elementaren Gasen oder durch ultraviolette Belichtung aus verschiedenen Metallen erzeugt werden, hat ergeben, daß die spez. Ladung $\frac{e}{m}$ aller negativen Strahlen, aus welchem chemischen Element sie auch erzeugt werden, immer denselben oben angegebenen Wert besitzt. Ferner hat sich ergeben, daß die Atome mehrerer radioaktiver Elemente bei ihrer Umwandlung in Atome

anderer Art negative Quanten ausstrahlen, deren spez. Ladung $\frac{e}{m}$ ebenfalls diesen Wert besitzt.

Aus diesen Erfahrungen ziehen wir den Schluß, daß alle abtrennbaren negativen Quanten aller chemischen Atome negative Elektronen von identischer Natur sind, jedenfalls in dem Zustand nach der Abtrennung von den Atomen. Hieraus darf nicht gefolgert werden, daß die abtrennbaren Elektronen auch innerhalb des Atomverbandes in allen Arten chemischer Atome dieselbe Bindung an positive Quanten besitzen. Es ist vielmehr zu erwarten, daß die elektrischen Felder zwischen den abtrennbaren Elektronen und den mit ihnen verbundenen positiven Quanten von Atom- zu Atomart eine sprungweise Variation ihrer Form und Stärke zeigen.

## § 12. Masse des positiven Atomions.

Wie negative Elementarquanten so können auch gleich große positive Quanten von gleich großer und gleich gerichteter Geschwindigkeit in Bündeln elektrischer Strahlen vorkommen. Die positiven Strahlenquanten kann man ebenso wie die negativen Elektronen in einem endlichen homogenen elektrischen und magnetischen Feld verlaufen lassen und durch Beobachtung ihrer elektrischen und magnetischen Ablenkung ihre Masse ermitteln. Dies geschah in exakter Weise bis jetzt in zwei Fällen.

Stellt man in Wasserstoff von niedrigem Druck vor einer durchbohrten Kathode einen großen Abfall der elektrischen Spannung her, so beobachtet man, daß durch den Kanal in der Kathode ein Strahlenbündel in den Raum hinter dieser austritt und auf einem fluoreszenzfähigen Schirm seine Auftreffstelle durch Lichtemission markiert. Läßt man dieses Bündel von Strahlen, die aus naheliegendem Grunde Kanalstrahlen genannt wurden, bei sehr niedrigem Druck auf einem kurzen Teile seines Weges zwischen Kathode und Schirm in einem zur Strahlenrichtung normalen elektrischen Feld $\mathfrak{E}$ und gleichzeitig in einem diesem parallelen magnetischen Felde $\mathfrak{H}$ verlaufen, so beobachtet man, daß das Bündel

in zwei Teile[1]) zerlegt wird, von denen der eine unabgelenkt an der alten Stelle des Fluoreszenzschirmes auffällt, der andere dagegen nach einer anderen Stelle des Schirmes elektrisch in der Richtung von $\mathfrak{E}$ um den Betrag $a_e$ und gleichzeitig senkrecht zu der ursprünglichen Richtung des Strahlenbündels und senkrecht zu $\mathfrak{H}$ magnetisch um den Betrag $a_m$ abgelenkt ist. Aus dieser zuerst von W. Wien[2]) und später bei günstigeren Bedingungen von J. J. Thomson[3]) gemachten Beobachtung ist zu schließen, daß in einem Bündel von Kanalstrahlen in Wasserstoff positive Quanten von gleicher Geschwindigkeit und Masse vorkommen. Die quantitative Messung der Ablenkungen und der sie erzeugenden Felder ergab für diese positiven Strahlen den Wert $\frac{m_H}{E_H} = 3{,}5 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{g}^{1/2}\,\mathrm{cm}^{-3/2}\,\mathrm{sec}$.

Nun ergibt die Erfahrung, daß in elektrolytischen Leitern Wasserstoffatome verbunden mit positiver Ladung vorkommen. Bestimmt man einerseits das Gewicht $Q_H$ des Wasserstoffs, welcher zusammen mit der positiven Elektrizitätsmenge $E_H$ an die Kathode einer elektrolytischen Zelle tritt, so findet man als elektrochemisches Äquivalent den Betrag $\frac{Q_H}{E_H} = 3{,}5 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{g}^{1/2}\,\mathrm{cm}^{3/2}\,\mathrm{sec}$. Nimmt man die Hypothese der atomistischen Struktur der chemischen Materie an, so führt die Gleichartigkeit der chemischen Individuen einer-

1) Wie W. Wien und J. J. Thomson nach verschiedenen Methoden gezeigt haben, besteht das unabgelenkte Bündel der Kanalstrahlen, wenigstens unmittelbar hinter dem ablenkenden Feld, aus schnellen elektrisch neutralen Atomen. Läßt man nämlich dieses Bündel auf einem relativ zum Weg im Feld längeren Weg verlaufen, dann kann man aus ihm durch ein zweites elektromagnetisches Feld wieder positive Strahlen herauslenken. Diese Erscheinung läßt sich daraus erklären, daß ein Kanalstrahlenbündel im allgemeinen gleichzeitig positive und neutrale Strahlen in einem bestimmten Verhältnis enthält, das sich, wenn es durch Auseinanderlenkung der Strahlen gestört wird, von selbst durch die Wechselwirkung zwischen positiven Atomionen, neutralen Atomen und negativen Elektronen bei Zusammenstößen wiederherstellt.

2) W. Wien, Ann. d. Phys. **5**, 421, 1901; **8**, 257, 1902; **9**, 660, 1902.

3) J. J. Thomson, Phil. Mag. **13**, 562, 1907; **16**, 657, 1908.

seits, die Tatsache der atomistischen Struktur der Elektrizität anderseits mit Notwendigkeit zu der Folgerung, daß einerseits die Massen, anderseits die elektrischen Ladungen der Wasserstoffionen gleich sind, daß also jenes elektrochemische Äquivalent des Wasserstoffs die spez. Ladung $\frac{m_H}{E_H}$ des einzelnen elektrolytischen Wasserstoffions darstellt.

Die Identität der spez. Ladungen des positiven Wasserstoffions und des positiven Strahles in Wasserstoff führt zu der Folgerung, daß das positive Strahlenteilchen in Wasserstoffgas seiner Masse nach identisch ist mit dem Wasserstoffatom. Hierbei wird die unbedenkliche Voraussetzung gemacht, daß die Zahl der positiven Quanten des Strahlenteilchens und des elektrolytischen Wasserstoffions dieselbe ist.

Insofern bei dem elektrolytischen Wasserstoffion und bei dem positiven Wasserstoffkanalstrahl das positive Ladungsquantum mit einem chemischen Atom verknüpft erscheint, heißt das System positives Atomion.

Nachdem auf Grund zahlreicher Erfahrungen feststeht, daß die von den chemischen Atomen abtrennbaren negativen Quanten Elektronen von identischer Natur sind, ergibt sich ohne weiteres die Folgerung, daß die positiven Atomionen dadurch aus elektrisch neutralen Atomen entstehen, daß von diesen negative Elektronen abgetrennt werden.

Wie durch besondere Beobachtungen (vgl. § 6) festgestellt wurde, ist die Ladung des positiven Wasserstoffions gleich der Einheit des elektrischen Elementarquantums. Hieraus sowie aus seiner spez. Ladung berechnet sich als Masse des positiven Wasserstoff-Atomions der Wert $m_H = 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ g.

Vergleichen wir hiermit den oben ermittelten Wert der Masse des freien negativen Elektrons $m_E = 8{,}9 \cdot 10^{-28}$ g, so sehen wir, daß wir die Masse des positiven Atomions praktisch gleich der Masse des neutralen chemischen Atoms setzen können. Wir machen hierbei allerdings die weiter unten näher begründete Voraussetzung, daß wenn auch nicht exakt, so doch mit sehr großer Annäherung die

Masse des neutralen Atoms gleich ist der Masse des Systems Atomion-Elektron.

Nachdem auf die vorstehende Weise einmal die Masse eines chemischen Atoms, nämlich diejenige des Wasserstoffatoms, ermittelt worden ist, läßt sich die Masse der Atome aller anderen chemischen Stoffarten ermitteln, da ja das Verhältnis $a$ des Atomgewichts eines beliebigen Elementes zu demjenigen des Wasserstoffs durch chemische Untersuchungen bekannt ist. Es ist nämlich die Masse des Atoms eines Elementes $X$ gleich $m_X = a_X\, m_H = a_X\, 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ g.

Bei der großen Tragweite, welche den vorstehenden Erfahrungen über das positive Atomion für den Fall des Wasserstoffes beizumessen ist, erscheint es wünschenswert, zum Zweck der Verallgemeinerung noch weitere Fälle chemischer Atome Strahlen positiver Atomionen genau zu untersuchen. Dies ist in folgender Weise bereits für Helium geschehen.

Die Atome einer Reihe von radioaktiven Elementen senden bei ihrer Umwandlung in Atome von kleinerer Masse Strahlen aus, welche sich durch elektrische und magnetische Felder im Sinne bewegter positiver elektrischer Quanten ablenken lassen; sie wurden von E. Rutherford[1]) $\alpha$-Strahlen genannt. Dieser Forscher hat auch durch Messung ihrer elektrischen und magnetischen Ablenkung ihre Geschwindigkeit sowie ihren Wert von $\frac{E_\alpha}{m_\alpha}$ zu $1{,}7 \cdot 10^{-15}\, g^{1/2}\, cm^{-3/2}\, sec$ bestimmt. Weiter gelang es ihm zu zeigen, daß die $\alpha$-Teilchen, wenn sie nach zahlreichen Zusammenstößen mit chemischen Atomen zum Stillstand gebracht werden, das Spektrum des Heliums zeigen. Wir haben darum die $\alpha$-Strahlen mit positiven Heliumatomionen von großer Geschwindigkeit zu identifizieren. Da gemäß dem Obigen deren Masse $m_{He} = m_\alpha = a_{He}\, 1{,}6 \cdot 10^{-24}\, g = 4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ g ist, so ergibt die Kombination dieses Wertes mit dem Wert der spez. Ladung der $\alpha$-Strahlen als Ladung des $\alpha$-Teilchens oder positiven Heliumatomions den Betrag

1) E. Rutherford, Phys. Zeitschr. **4**, 235, 1902; Phil. Mag. **10**, 163, 1905; **12**, 134, 1906.



$2 \times 4{,}7 \cdot 10^{-10}$ stat. Einh., also das Zweifache des elektrischen Elementarquantums. Auch in diesem Falle entsteht demnach aus einem neutralen chemischen Atom durch Abtrennung negativer Elektronen ein Vielfaches von positiven Quanten, welche fest mit der Masse des chemischen Atoms verbunden bleiben.

## § 13. Hypothese über das Archion und die Struktur des chemischen Atoms.

Die Erfahrung, daß negative Quanten von sehr kleiner Masse aus chemischen Atomen frei gemacht werden können, hat viele Versuche veranlaßt, das positive Gegenspiel des negativen Elektrons, also positive Quanten von einer Masse gleich derjenigen des Elektrons, in Form positiver Strahlen aufzufinden. Indes ist bis jetzt keine zuverlässige Beobachtung positiver Elektronstrahlen bekannt geworden. Man könnte dieser Erfahrung gegenüber zu der schwer zu prüfenden Hypothese seine Zuflucht nehmen, daß das positive Elektron einen viel größeren Energieaufwand als das negative Elektron zu seiner Abtrennung von einem Atom beansprucht. Mit dieser Hypothese setzt man aber an Stelle der aus der Erfahrung unmittelbar folgenden Dissymmetrie zwischen positiver und negativer Elektrizität hinsichtlich Masse und Abtrennbarkeit lediglich eine andere Dissymmetrie, ohne diese weiter erklären und ohne an die einem Schematismus zuliebe gerettete Annahme einer kleinen Masse des positiven Quantums irgendeine experimentelle oder theoretische Folgerung zu knüpfen. Und wenn wirklich die Abtrennung der hypothetischen positiven Elektronen sehr große Energiequanten verbraucht, so wäre zu erwarten, daß bei dem radioaktiven Zerfall chemischer Atome unmittelbar oder mittelbar positive Elektronen freigemacht werden. Denn bei diesem Prozeß treten so große Energiequanten in Wirkung, wie wir sie sonst nirgends in der Erfahrung kennen, und trotzdem sind auch bei diesem Phänomen wenigstens bisher noch keine positiven Elektronstrahlen beobachtet worden.

Während somit auf der einen Seite das Suchen nach freien positiven Elektronen bisher ohne Erfolg geblieben ist, so sind auf

der anderen Seite an der Lichtemission[1]) der Kanalstrahlen in anderen Gasen als Wasserstoff Beobachtungen gemacht worden, welche es wahrscheinlich machen, daß auch eine Reihe anderer chemischer Elemente als Wasserstoff und Helium Strahlen positiver Atomionen zu liefern vermag.

Unter diesen Umständen ist es wohl gerechtfertigt, wenn wir die quantitative Erfahrung an den Atomionen des Wasserstoffs und des Heliums in folgender Weise verallgemeinern.

Zwar nicht hinsichtlich der Größe der Ladung, wohl aber hinsichtlich der ihnen anhaftenden Masse besteht eine große Dissymmetrie zwischen dem positiven und dem negativen Quantum relativ zueinander und relativ zu den chemischen Atomen; die Masse des negativen Quantums, des Elektrons, ist viel kleiner als die dem positiven Quantum untrennbar anhaftende Masse und zudem unabhängig von dem Ursprung der Elektronen aus verschiedenartigen chemischen Atomen die gleiche. Die an das positive Quantum geknüpfte Masse ist im Minimum gleich der Masse eines chemischen Atoms und wie diese von Element zu Element verschieden groß.

Das positive Quantum erscheint demnach hinsichtlich der Masse als integrierender Bestandteil des Individuums, das wir chemisches Atom nennen; Abtrennung eines positiven Quantums von einem Atom ist darum begleitet von dem Aufhören der Existenz des ursprünglichen Individuums, also von dem Zerfall des chemischen Atoms. Abtrennung eines Elektrons von dem chemischen Atom ist dagegen eine nicht tödliche, umkehrbare Veränderung des Individuums.

Wie bereits das Beispiel des Heliumatoms lehrt, können einem Atom mehrere abtrennbare negative Elektronen angehören. Damit erhebt sich die Frage, ob die positive Ladung gleichmäßig über alle Teile des Atoms verbreitet ist, oder ob in einem chemischen Atom mehrere voneinander unterscheidbare positive Quanten vor-

---

1) J. Stark, Physik. Zeitschr. **6**, 892, 1905; Ann. d. Phys. **21**, 401 1906; **26**, 806, 1908.

kommen. Die Erfahrung, daß ein Atom bei seinem Zerfall ein $\alpha$-Teilchen mit zwei positiven Quanten ausstößt und daß das neue von ihm erzeugte Atom, der Atomrest, unter Zerfall wieder ein $\alpha$-Teilchen mit zwei positiven Quanten absondern kann, ist dahin zu deuten, daß jedenfalls in den Atomen der radioaktiven Elemente mehrere diskrete positive Quanten vorkommen.

Wir verallgemeinern diese Erfahrung zu folgender Hypothese. In allen chemischen Atomen, vielleicht mit Ausnahme des Wasserstoffes, kommen mehrere diskrete positive Quanten vor, ihre Masse ist ein Teil der Atommasse; sie sind integrierende unabtrennbare Bestandteile des Atomindividuums; ihre Ladungen sind entgegengesetzt gleich derjenigen des negativen Elektrons und werden hinsichtlich ihres elektrischen Kraftflusses durch eine das neutrale Atom umhüllende Fläche kompensiert durch die Ladungen einer Anzahl negativer Elektronen; jedenfalls ein Teil von diesen ist abtrennbar.

Als Konsequenz ergibt sich aus dem Vorstehenden, daß die positive Ladung, welche ein ionisiertes Atom, ein Atomion, einem Beobachter darbietet, der den gesamten elektrischen Kraftfluß durch eine es umhüllende Fläche mißt, nicht gleichmäßig durch das ganze Atom verteilt ist, sondern ihren Sitz in einer bestimmten Partie des Atoms hat, nämlich in demjenigen positiven Quantum, von welchem das seine Ladung nach außen kompensierende negative Elektron fortgenommen ist.

Auf Grund der vorstehenden auf der Erfahrung basierten Folgerungen kann die nachstehende Definition eines neuen physikalischen Individuums kaum Bedenken erwecken. Wie festgestellt wurde, kann ein chemisches Atom mehrere voneinander trennbare positive Quanten enthalten, mit denen eine Masse von der Ordnung derjenigen des Wasserstoffatoms verbunden ist; wir dürfen nach dem jetzigen Stand unserer Erfahrung die Möglichkeit nicht ausschließen, daß dies auch für das kleinste chemische Atom, das Wasserstoffatom, gilt. Als Archion definieren wir nun das Individuum, welches eine elektrische Ladung gleich derjenigen des positiven Elementarquantums besitzt und

dessen mit dieser Ladung behaftete Masse nicht kleiner gemacht werden kann, ohne daß das Individuum als solches zu existieren aufhört. Die Bezeichnung positives Quantum soll lediglich die Größe der elektrischen Ladung, nicht die mit ihr verknüpfte Masse charakterisieren. Das Wort Archion soll, analog dem Wort Elektron, die Aussage über die Ladung und jene Aussage über die minimale mit der Ladung verbundene Masse vereinigen.

Während die Annahme, daß in den chemischen Atomen unabtrennbare Archionen enthalten sind, durch die oben dargelegten Erfahrungen ebenso wahrscheinlich gemacht wird wie die Hypothese, daß in ihrem Verbande abtrennbare Elektronen vorkommen, entfernen sich die nachstehenden Hypothesen über den Aufbau des chemischen Atoms aus Archionen und Elektronen beträchtlich weit von dem sicheren Boden der Erfahrung. In der Richtung der in der vorliegenden Schrift entwickelten Atomdynamik stellen sie einen ersten Versuch dar, die bis jetzt vorliegenden Erfahrungen über die in materiellen Medien vorkommenden elektrischen Quanten zu einer systematischen Skizze von der Struktur des chemischen Atoms zusammenzufassen und durch Vermutungen zu ergänzen. Der Zweck dieser provisorischen skizzenhaften Hypothese über die Struktur des chemischen Atoms ist ein heuristischer; sie soll die Anregung zur Aufsuchung neuer Eigenschaften und Relationen der chemischen Atome geben.

Die von verschiedenartigen chemischen Atomen abgetrennten Elektronen besitzen die gleiche Ladung und Masse; verschiedenartige chemische Atome senden bei ihrer Umwandlung Teile von gleicher Ladung und Masse aus; in dem periodischen Systeme der chemischen Elemente zeigt sich längs der Horizontal- und der Vertikalreihen eine gewisse Regelmäßigkeit in der Variation der chemischen und physikalischen Qualitäten der verschiedenen Atomarten. Diese Tatsachen legen uns die Vermutung nahe, daß die Archionen verschiedenartiger chemischer Atome insofern hinsichtlich ihrer Ladung, Masse und Struktur identischen Charakter haben, als sie bei ihrer Abtrennung von den Atomen Individuen von identischen physi-

kalischen Qualitäten liefern würden. Ihre Massen innerhalb der chemischen Atome dürften wohl annähernd gleich, können aber immerhin merklich voneinander verschieden sein. Wie nämlich bereits oben bemerkt wurde, haben wir mit der Möglichkeit zu rechnen, daß die Masse eines Individuums von dem Bindungsverhältnis zu anderen Individuen beeinflußt wird. Dieses Bindungsverhältnis der Archionen dürfte von Atom- zu Atomart variieren und kann selbst bei den verschiedenen Archionen einer und derselben Atomart verschieden sein.

Wie oben (§ 10) festgestellt wurde, kommen in den chemischen Atomen Stromkreise vor, in denen sich elektrische Quanten widerstandslos ohne Zusammenstoß mit anderen Teilchen bewegen. Diesen Stromkreisen können nicht die abtrennbaren Elektronen angehören, da sie zu Bewegungen durch Stoß von außen her veranlaßt werden, welche sie aus den Atomen heraus zu Zusammenstößen mit anderen Atomen führen können. Wir vermuten darum, daß die elementaren widerstandslosen Stromkreise der chemischen Atome in den Archionen lokalisiert sind, daß also die Archionen der chemischen Atome ihre magnetischen Elementarmomente darstellen.

Ist dies der Fall, dann müssen die Archionen eines chemischen Atoms magnetische Direktionskräfte aufeinander ausüben und sich wechselseitig in einer bestimmten relativen Winkelstellung festhalten. Außerdem müssen sie aufeinander in der Richtung der Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte bei entsprechender Orientierung anziehende Kräfte aufeinander ausüben. Denn die Abstände ihrer Mittelpunkte im Atome sind sehr wahrscheinlich so klein, daß das magnetische Feld eines Archions im Gebiet des unmittelbar benachbarten Archions nicht homogen ist. Ist dies der Fall, dann üben zwei magnetische Momente nicht ausschließlich nur ein Drehmoment (§ 9) aufeinander aus, sondern außer diesem auch noch eine verschiebende Kraft[1]), wie die Beobachtung an endlichen magnetischen

1) Auch bei der oben (§ 10) beschriebenen Einstellung magnetischer Stäbchen in einem inhomogenen Magnetfeld sind neben Drehkräften Schubkräfte wirksam.

Momenten ergibt, und zwar ziehen sich diese wechselseitig an, wenn ihre Achsen gleiche Richtung haben.

Hieraus folgt, daß sich mehrere Archionen dank ihrer wechselseitigen magnetischen Orientierung und Anziehung zu einem Individuum längs einer in sich zurücklaufenden Kurve so zusammenbauen können, daß längs derselben die Achsen der Archionen (Elementarmomente) in gleichem Sinne aufeinanderfolgen. Ein solches Individuum wird gegen eine Öffnung der Archionenkurve durch einen Eingriff von außen her mit einer Kraft reagieren, an welcher alle Archionen längs der Kurve mitwirken.

In einem derartigen von der magnetischen Kraft zusammengebauten Archionengebilde muß aus der Gleichnamigkeit der elektrischen Ladungen benachbarter Archionen eine abstoßende Kraft zwischen diesen zur Entwicklung kommen. Diese wird eine Dilatation der Archionenkurve zur Folge haben. Gelangen in die Nähe der positiv geladenen Archionenringe[1]) negative Elektronen, so werden von diesen so viele in den Ring eingebaut, als in ihm positive Quanten vorhanden sind. Und zwar begeben sie sich an solche ausgezeichnete Stellen des Archionenindividuums, wo die wechselseitige elektrische Bindung positiver und negativer Ladungen am intensivsten werden kann. Derartige neutralisierende Elektronen können nach ihrem Einbau in das Archionen-Individuum offenbar wieder abgetrennt werden, ohne daß dessen Existenz aufhört.

Auf Grund der vorstehenden Überlegungen bietet sich nun von selbst die Hypothese dar, daß das chemische Atom ein ringförmiges Individuum aus unabtrennbaren positiv geladenen Archionen und eingebauten abtrennbaren negativ geladenen Elektronen ist und außer diesen Bestandteilen keine weiteren mehr umfaßt.

In der vorstehenden Hypothese über die Struktur des chemi-

---

1) Die axiale Kurve des Archionenringes braucht nicht ausschließlich ein Kreis zu sein. Wir haben vielmehr die Möglichkeit offen zu lassen, daß sie irgendeine geschlossene Raumkurve ist.



schen Atoms haben wir alle vorausgehenden Folgerungen aus Erfahrungen über die elektrischen Quanten im dielektrischen und magnetischen Medium und in den elektrischen Strahlen zu einer Aussage über die chemischen Atome der materiellen Körper zusammengefaßt; sie liefert rückwärts alle experimentell ermittelten Eigenschaften des elektromagnetischen Mediums und der elektrischen Strahlen. Die Aufstellung einer solchen allgemeinen Hypothese wäre aber eine überflüssige, belästigende Arbeit, wenn wir sie nicht zu einer systematischen Beschreibung der chemischen und physikalischen Qualitäten der in dem periodischen System in Relation gesetzten chemischen Elemente benützen und mit ihrer Hilfe neue Relationen aufsuchen würden. Dieser Ausbau der obigen allgemeinen Atomhypothese muß indes Aufgabe einer besonderen Schrift bleiben. Hier sei lediglich noch auf zwei Punkte hingewiesen.

Es ist oben (§ 8) von einem Quantenpar die Rede gewesen, in welchem ein positives Quantum mit einem negativen verbunden ist. Nach der eben gewonnenen Vorstellung von der Struktur des chemischen Atoms ist es nicht notwendig, daß ein abtrennbares negatives Elektron seine Kraftlinien nur ausschließlich einem positiven Archion oder Quantum im Atom zusendet, es ist vielmehr wahrscheinlicher, daß es gleichzeitig an mehrere Archionen des eigenen Atoms gebunden ist. Immerhin gilt aber auch in diesem Falle die Beziehung, daß der elektrische Kraftfluß, welcher von dem Elektron ausgeht, in einem gleich großen Kraftfluß sich fortsetzt, welcher an entgegengesetzt gleich großer positiver Ladung endigt.

Wenn hier das Archion als der Träger des positiven Quantums erklärt wird, so soll damit keine Aussage über die Struktur des Archions etwa in dem negativen Sinne gemacht werden, daß in seinem Innern nicht auch negative Elektronen vorkommen, die eine zyklische Bewegung besitzen und integrierende Bestandteile von ihm sind. Dieses Problem [1]) der Struktur des Archions muß seiner Schwierigkeit wegen zunächst zurückgestellt werden vor dem Problem des Aufbaues der chemischen Atome aus Archionen und Elektronen.

1) Vgl. J. Stark, Physik. Zeitschr. **8**, 881, 1907.

IV. Kapitel.

# Energie und Struktur des stationären elektromagnetischen Feldes.

## § 14. Prinzipielle Bedeutung und Atomisierung der Energie.

Der elektrischen Ladungsmenge haben wir bereits oben stillschweigend ein gewisses Volumen zugewiesen, als wir bei Ableitung des Gesetzes

$$\mathfrak{K}_e = \frac{E_1 E_2}{r^2}$$

die Voraussetzung machten, daß die linearen Dimensionen der von $E_1$ und $E_2$ eingenommenen Räume klein seien gegen $r$. Nach Ermittlung der atomistischen Struktur der elektrischen Ladungen haben wir die spezielle Aufgabe zu lösen, aus der Erfahrung Aufschluß über die Volumina zu gewinnen, in welchen die Ladungen des positiven und des negativen Quantums verteilt sind.

Indes ist mit der Lösung dieser Teilaufgabe noch nicht die allgemeine Aufgabe gelöst, durch das ganze Volumen eines Quantums eine Substanz von gewisser Struktur zu verteilen. Denn das Volumen eines elektrischen Quantums beschränkt sich nicht auf den mit seiner Ladung erfüllten Raumteil (Innenvolumen), sondern wir haben es von dem Ladungsvolumen oder Innenvolumen weg so weit in den benachbarten Raum hineinzuerstrecken, als sich eine Kraft auf ein zweites Quantum bemerkbar machen kann. Mit welcher Substanz ist dieses äußere, nicht mit Ladung erfüllte, aber

an dieses geknüpfte Volumen eines elektrischen Quantums (Außenvolumen) zu erfüllen?

Noch vor wenigen Jahren wäre auf diese Frage ziemlich allgemein die Antwort erfolgt: Mit Masse. Denn in den älteren Lehrbüchern der Mechanik, in den naturwissenschaftlichen Anschauungen vieler Gelehrten galt und gilt die Masse als der Träger und die Voraussetzung alles physikalischen Geschehens; manche glauben, daß für die Möglichkeit, sich physikalisch etwas vorzustellen, der Begriff der Masse ebenso primär notwendig sei wie der Begriff des Raumes oder der Zeit. Die Auffassung von der prinzipiellen Bedeutung der Masse hat zudem noch dadurch eine Stärkung erfahren, daß eine willkürlich gewählte Maßeinheit für die Masse neben den Einheiten der Raum- und Zeitdimension als fundamentale Dimension für die Aufstellung des Maßsystems der physikalischen Größen gewählt wurde. Diese Überschätzung des Begriffes der Masse ist indes in erster Linie eine Wirkung der Schule, sie ist sachlich nicht gerechtfertigt. Wir können eine Masse nicht für sich allein primär beobachten, wie etwa eine Kraft oder eine Länge, sondern physikalisch quantitativ und auch im physischen Gefühl definieren wir erst indirekt nach der Beobachtung einer Kraft auf einen Körper und der an diesem hervorgebrachten Beschleunigung die Masse als das Verhältnis dieser beiden Größen. Die Erfahrung (vgl. § 18), daß die Masse des negativen Elektrons eine Funktion der Geschwindigkeit ist, hat zuerst jene beherrschende Stellung des Begriffes der Masse im naturwissenschaftlichen Denken erschüttert; die Entwicklung des Relativitätsbegriffes (vgl. § 19) hat über den Begriff der Masse denjenigen der Energie gesetzt und ihm einen erweiterten Inhalt gegeben, ihn nämlich nicht bloß, wie es bisher geschah, auf die an die materiellen Körper gebundene Energie angewandt, sondern auch auf die von materiellen Körpern losgelöste elektromagnetische Strahlungsenergie.

Diese Reduktion des Begriffes der Masse auf den Begriff der Energie, die Erfahrung, daß die Energie diejenige Substanz in der Physik ist, deren Menge konstant ist, endlich die Bemerkung, daß alle chemischen und physikalischen Vorgänge in letzter Linie eine

Änderung in der raumzeitlichen Verteilung der Energie darstellen, mag uns veranlassen, die Energie als das Primäre in der wissenschaftlichen Darstellung physikalischer und chemischer Prozesse zu wählen, ihre fundamentalen Qualitäten und Gesetze aufzusuchen und aus diesen die komplizierteren Erscheinungen und die physikalischen Begriffe abzuleiten, welche wir bis jetzt an die Spitze unserer experimentellen und theoretischen Untersuchungen setzten. Wenn wir uns auf diesen Standpunkt stellen, so müssen wir freilich zugeben, daß wir erst an dem Anfang einer lange Zeit beanspruchenden Umbildung unserer Wissenschaft stehen. Und wenn im folgenden der Versuch gemacht wird, den Begriff des Elektrons, der elektrischen und magnetischen Kraft zu „energisieren", so hat dieser Versuch nur die Bedeutung eines Programms, nicht diejenige abgeschlossener Resultate.

Als prinzipiellen, nicht weiter reduzierbaren Begriff, als ursprüngliche, ihrer Menge nach konstante Substanz der Physik führen wir also die Energie ein. Sie verteilen wir im Innen- und im Außenvolumen des elektrischen Quantums. Diesem haben wir demnach unter allen Umständen eine Energiemenge zuzuordnen, ohne die es nicht existieren kann; wir haben das positive Archion und das negative Elektron als eine raumzeitliche Struktur von Energie zu betrachten. Wie die Ladung eines Quantenaggregates aus einer Zahl diskontinuierlicher Ladungsquanten sich zusammensetzt, so baut sich auch die an dem Aggregat lokalisierte Energiemenge aus den einzelnen in den verschiedenen Quantenvolumina verteilten Energiequanten auf. Daraus, daß die Energie eines Quantenaggregates bei konstanter Zahl der Quanten kontinuierlich geändert werden kann, haben wir indes zu folgern, daß die in dem Volumen oder Feld eines einzelnen Quantums enthaltene Energie nicht eine von dem Abstand oder der Geschwindigkeit relativ zu anderen Quanten unabhängige Konstante ist, sondern mit jenen Größen variabel ist.

Aus der Erfahrung, daß die an einem Quantenaggregat lokalisierte Energie verschiedene Wirkungen (elektrische, magnetische Kraft) ausüben und durch Beobachtung verschiedener Größen

(Konfiguration, relative Geschwindigkeit) charakterisiert werden kann, schließen wir, daß die in den Feldern der einzelnen Quanten verteilte Energie verschiedene Formen haben kann. Da sich diese in raumzeitlichen Wirkungen zwischen Quanten äußert, so suchen wir die Form der Energie eines Quantums in einer bestimmten raumzeitlichen Verteilung oder Struktur der Quantenenergie relativ zu dem Quantum selbst und relativ zu anderen Quanten.

Die Änderung der an ein elektrisches Quantum geknüpften Energiemenge verknüpfen wir quantitativ mit der Änderung der raumzeitlichen Struktur seiner Energie, also mit einer Änderung des Volumens und der Form des elektrischen Quantums. Insofern die raumzeitliche Struktur der Quantenenergie mit dem Abstand und der Geschwindigkeit relativ zu anderen Quanten kontinuierlich veränderlich ist, ändert sich auch die relative Menge der Quantenenergie kontinuierlich. Die Energie eines Quantenaggregates ist also insofern atomistisch konstituiert, als sie sich in die Volumina einer endlichen Anzahl von einzelnen Quanten verteilt, sie hat indes insofern die Eigenschaft eines raumzeitlichen Kontinuums, als sie kontinuierlich ihre Größe mit Volumen und Zeit des Quantums ändern kann.

Die Änderung der an ein elektrisches Quantum geknüpften Energiemenge bedeutet eine Änderung der raumzeitlichen Relation des Feldes des Quantums in bezug auf andere Quanten. Da die Erfahrung immer in der raumzeitlichen Relation beobachtender Körper zu beobachteten Körpern besteht, so folgt, daß die Erfahrung uns unmittelhar nur die Änderung der Energie eines Quantenaggregates oder eines einzelnen Quantums liefern kann. Wir können somit durch das Experiment direkt nur die Differenz der Energie einer Quantenrelation gegen eine andere Relation bestimmen. Der Übersichtlichkeit halber beziehen wir in dieser Weise die Energie einer jeden Quantenrelation bestimmter Art auf eine und dieselbe Relation der gleichen Art und nennen diese normal. So sprechen wir von der elektrischen oder potentiellen Energie eines Quantenaggregates oder Quantums relativ zu derjenigen einer gewissen normalen Konfiguration, oder von

der magnetischen oder kinetischen Energie relativ zu einer normalen Relativgeschwindigkeit. Als normale Werte der Energie, gegen welche wir die Differenz anderer Energiewerte bilden, führen wir Minimalwerte ein, d. h. Werte der Energie, welche kleiner sind als die anderen Energiewerte, welche wir durch Änderung der raumzeitlichen Relation von Quanten mit unseren experimentellen Hilfsmitteln realisieren können; so beziehen wir die magnetische Energie eines einzelnen Quantums auf den Wert Null, welcher der Relativgeschwindigkeit Null entspricht.

Wie die Erfahrung auf dem Umweg über Aggregate lehrt, können wir die an ein einzelnes Quantum oder an ein Quantenpaar geknüpfte Energiemenge künstlich variieren, aber die künstliche Verkleinerung muß in der Erfahrung schließlich bei einem Werte ein Ende finden, der größer ist als Null. Denn die Reduktion der Energie eines Quantums auf Null würde das Aufhören der Existenz des Quantums bedeuten. Nach unserer bisherigen Erfahrung wird indes wohl die relative raumzeitliche Anordnung elektrischer Quanten, aber nicht ihre Zahl verändert. Die Möglichkeit freilich, daß elektrische Quanten erzeugt und zerstört werden können, müssen wir vorderhand zulassen; indes müssen wir annehmen, daß hierbei jedenfalls die primäre physikalische Substanz, die Energie, ihrer Menge nach ungeändert bleibt.

Gemäß dem Vorstehenden eignen wir der Energie den Begriff einer Substanz zu, welche eine raumzeitliche Struktur besitzt und quantenhaft in bestimmter Struktur um ein Zentrum an den elektrischen Quanten lokalisiert ist. Von diesem prinzipiellen Standpunkt aus bietet sich die physikalische Welt einem raumzeitlichen Beobachter, der selbst ein Aggregat oder eine individuelle Struktur von Energiequanten ist, dar als raumzeitliche Änderung in der Verteilung der Energie an die physikalischen Individuen. Die Erfahrungen, welche diese voneinander machen, bestehen in der Änderung der in ihren Volumina sitzenden relativen Energiemengen; die Größe und Richtung der an ihnen hierbei wirkenden Kräfte wird bestimmt durch die Menge und

raumzeitliche Verteilung der in ihr Volumen eintretenden oder aus ihm austretenden Energiemenge.

Um Mißverständnisse auszuschließen, ist folgende Bemerkung über das Wort Energiequantum vielleicht nicht überflüssig. Dieses Wort soll nicht die Aussage einschließen, daß die an ein physikalisches Individuum oder Atom geknüpfte Energiemenge eine unveränderliche, unteilbare Größe ist, wie dies für das elementare Quantum der elektrischen Ladung gilt; es soll lediglich zum Ausdruck bringen, daß die an ein physikalisches Atom geknüpfte Energiemenge in sich zusammenhängt, darum im Atomfeld konzentriert bleibt und auch bei einer elementaren Wirkung des Atoms als eine Einheit ins Spiel treten kann.

## § 15. Innen- und Außenvolumen des Elektrons und des Archions.

Wie bereits dargelegt wurde, haben wir an einem elektrischen Quantum zwischen einem Innenvolumen und einem Außenvolumen zu unterscheiden; jenes enthält die elektrische Ladung des Quantums, dieses vermittelt die Kraft zwischen verschiedenen Quanten. Könnten wir an einzelnen Quanten operieren, so könnten wir das Innenvolumen des Quantums auf folgende Weise definieren. Wir machen den Abstand $r$ zwischen zwei Quanten zunächst so groß, daß eine das einzelne Quantum konzentrisch umhüllende Kugelfläche vom Radius $\frac{r}{2}$ von dem elektrischen Kraftfluß $4\pi e$ geschnitten wird. Unter dieser Voraussetzung ermitteln wir dann für eine bestimmte relative Axenstellung der zwei Quanten das Gesetz der Kraft $\mathfrak{K}_e = kf(r)$ zwischen ihnen. Hierauf verkleinern wir den Abstand, lassen also die Kugelflächen sich kontrahieren; solange $\mathfrak{K}_e = kf(r)$ ist, oder mit anderen Worten, solange die jedes Quantum umhüllende Kugelfläche $r^2\pi$ vom Kraftfluß $4\pi e$ geschnitten wird, liegt die Kugelfläche in dem Außenvolumen. Wenn schließlich bei einem für menschliche Begriffe kleinen, immerhin

aber von Null verschiedenem Werte des Kugelradius $\varrho$ die Relation $\mathfrak{K}_e = kf(r)$ nicht mehr zu gelten anfängt, wollen wir als Innenvolumen des Quantums das Volumen $\frac{4}{3}\varrho^3\pi$ der mit ihm konzentrischen Kugel definieren. Haben wir bei diesem Versuch zwei gleichartige Quanten in Relation gebracht, so können wir gemäß vorstehender Definition sagen, daß bei dem Abstand $r = 2\varrho$ die Innenvolumina der zwei Quanten sich berühren.

Ehe wir zur experimentellen Abschätzung der Innenvolumina der elektrischen Quanten übergehen, sei erklärt, warum das Innenvolumen oder das Volumen der elektrischen Ladung ein Quantums einen von Null verschiedenen Wert haben muß.

Indem ein elektrisches Quantum eine Geschwindigkeit relativ zu einem anderen Quantum annimmt, gewinnt es relativ zu diesem eine magnetische Energie (§ 18, 20). Deren Größe hängt ab von dem Volumen der Quantenladung; je kleiner dieses ist, in desto engeren und dichteren Kurven umschlingen die magnetischen Kraftlinien das Quantum; hätte dessen Volumen eine unendlich kleine Dimension, so würde, wie die Rechnung ergibt, die magnetische Energie, welche das Quantum bei einem Geschwindigkeitszuwachs übernimmt, und somit seine Masse unendlich sich ergeben. Nun aber lehrt die Erfahrung, daß die Masse des positiven Atomions und des negativen Elektrons nicht unendlich groß, sondern für menschliche Begriffe klein ist. Daraus schließen wir, daß das Volumen des positiven und des negativen Quantums einen bestimmten von Null verschiedenen Wert hat.

Unsere menschlichen Methoden gestatten uns nicht, die Kraft zwischen zwei einzelnen Quanten zu bestimmen. Auch können wir nicht endliche Aggregate herstellen, die in einem meßbaren Volumen eine meßbare Zahl von Quanten nur einer Art sehr dicht gelagert enthalten, und dann das Aggregatvolumen an die einzelnen Quanten aufteilen; ein solches Quantenaggregat läßt sich wegen der großen abstoßenden Kräfte zwischen den gleichartigen Quanten nicht realisieren. Wir können die Volumina des posi-

tiven Quantums und des Elektrons vorderhand nur relativ zu dem Volumen eines chemischen Atoms abschätzen.

In einem chemischen Atom sind gleichviele positive und negative Quanten vorhanden. Gleichartige chemische Atome lassen sich darum in einem endlichen Aggregat dicht zusammenlagern, allein unter Benutzung der Anziehung zwischen den positiven und den negativen Quanten benachbarter Atome. Der Annäherung der chemischen Atome in einem Aggregat wirkt die relative kinetische Energie, die ungeordnet durch das Aggregat entsprechend der vorhandenen Temperatur verteilt ist, entgegen und strebt eine Volumenvergrößerung an. In einem festen oder flüssigen Aggregat chemischer Atome halten sich die das Volumen verkleinernde Wirkung der Quantenanziehung und die das Volumen vergrößernde Wirkung der thermischen Energie das Gleichgewicht; es resultiert darum für eine jede Temperatur ein bestimmtes Volumen eines festen oder flüssigen Aggregates von chemischen Atomen: Indem wir dieses Volumen messen und auf die in ihm enthaltenen chemischen Atome verteilen, erhalten wir für das einzelne chemische Atom ein Volumen, das wir „durchschnittlich" nennen wollen. Als „Innenvolumen" des chemischen Atoms definieren wir das Volumen der kleinsten Kugel, deren Fläche die Innenvolumina der an der Atomoberfläche liegenden Quanten, sie einschließend, eben berührt. Das durchschnittliche Volumen eines Atoms ist aus leicht ersichtlichem Grunde im allgemeinen größer als das Innenvolumen; es nähert sich indessen diesem um so mehr, je niedriger die Temperatur des flüssigen oder festen Aggregates ist.

Um dem Innenvolumen eines chemischen Atoms möglichst nahezukommen, hat man das durchschnittliche Volumen bei möglichst niedriger Temperatur zu ermitteln. Das spez. Gewicht des flüssigen Wasserstoffes bei $-241^0$ C beträgt $0{,}07 \frac{\text{g cm sec}^{-2}}{\text{cm}^3}$, das Gewicht des Wasserstoffatoms beträgt $1{,}6 \cdot 981 \cdot 10^{-24}$ g cm sec$^{-2}$; in 1 cm$^3$ sind also bei $-241^0$ C $\frac{0{,}07}{1{,}6 \cdot 981 \cdot 10^{-24}}$ Wasserstoffatome

enthalten; das durchschnittliche Volumen des Wasserstoffatoms beträgt darum bei $-241^0$ C $\frac{1,6 \cdot 981 \cdot 10^{-24}}{0,07} = 2,3 \cdot 10^{-20}$ cm³, der durchschnittliche Durchmesser $2,8 \cdot 10^{-7}$ cm. Das Innenvolumen des Wasserstoffatoms ist demnach kleiner als $2,3 \cdot 10^{-20}$ cm³. Von ihm schließen wir in hypothetischer Weise auf das Innenvolumen des positiven Quantums des Archions.

Das Wasserstoffatom enthält mindestens ein Archion, da jedenfalls ein negatives Elektron von einem Wasserstoffatom abgetrennt werden kann. Die Masse des Elektrons ist klein, verglichen mit der Masse des Atoms (§ 12); wie wir sogleich sehen werden, ist auch sein Innenvolumen klein, verglichen mit demjenigen des chemischen Atoms. Da nun andererseits das Archion nicht von dem chemischen Atom abgetrennt werden kann und da das Wasserstoffatom das kleinste chemische Element ist, das wir kennen, so vermuten wir, daß die Zahl der Archionen im Wasserstoffatom klein und daß das Innenvolumen des Archions von der Ordnung des Innenvolumens des Wasserstoffatoms, also kleiner als $2,3 \cdot 10^{-20}$ cm³ ist. Wir führen damit, um es ausdrücklich zu bemerken, über das Volumen des Archions (positiven Quantums) eine Hypothese[1]) ein. Wie wir später sehen werden, gewinnt diese Hypothese durch den Vergleich ihrer Konsequenzen mit der Erfahrung eine große Wahrscheinlichkeit.

Über das Innenvolumen des Elektrons können wir durch nachstehende Beobachtung Aufschluß gewinnen. Wir lassen zunächst ein Bündel Wasserstoffkanalstrahlen von bestimmter, beträchtlicher Geschwindigkeit auf eine dünne Schicht festen Aluminiums fallen. Wir beobachten dann, selbst wenn die Schichtdicke nur $1 \cdot 10^{-4}$ cm beträgt, hinter der Aluminiumfolie keine positiven oder neutralen Wasserstoffstrahlen. Dies erklärt sich daraus, daß die Zwischenräume zwischen den Innenvolumina der Atome des Aluminiums klein sind relativ zu dem Innenvolumen des einzelnen Wasserstoffstrahls. Bei ihrer dichten Annäherung an die

---

1) J. Stark, Physik. Zeitschr. **9**, 85, 1908; Jahrb. d. Rad. u. El. **5**, 124, 1908.

Innenvolumina der Aluminiumatome erfahren sie sehr große ablenkende und abstoßende Kräfte, so daß sie ihre Geschwindigkeit in der ursprünglichen Richtung einbüßen oder sogar in dieser zurückgeworfen werden. Wir stellen nun den gleichen Versuch mit einem Strahlenbündel negativer Elektronen (Kathodenstrahlen) an, und zwar soll die kinetische Energie des einzelnen Strahlenquantums die gleiche wie zuvor sein. Wir beobachten nunmehr, daß durch die Aluminiumfolie hindurch auf seiner Rückseite ein beträchtlicher Teil negativer Strahlen von unveränderter oder verkleinerter Geschwindigkeit austritt. Aus dieser Erscheinung schließen wir im Vergleich zu dem Verhalten der Wasserstoffstrahlen, daß das Innenvolumen des negativen Elektrons klein sein muß, verglichen mit dem Innenvolumen des Wasserstoffatoms, und somit gemäß unserer Hypothese auch klein relativ zu dem Innenvolumen des Archions.

Das Volumen eines elektrischen Quantums, das außerhalb der das Innenvolumen definierenden Kugelfläche liegt, ist das Außenvolumen des Quantums. Unter dem hier gewählten energetischen Gesichtspunkt ist die raumzeitliche Struktur des Energiefeldes eines elektrischen Quantums in allen Teilen des Außenvolumens von gleicher Art; verschieden davon ist wahrscheinlich die Art der raumzeitlichen Struktur der Energie in dem von der Ladung des sicht die oben genommenen Raum. Man darf indes in dieser Hin-
Quantums eingegebene Definition des Innenvolumens nicht mißverstehen; die das Innenvolumen definierende Kugelfläche braucht nämlich nicht ausschließlich energetisch gleichwertige Volumenteile zu umschließen; in seinem Innern können vielmehr energetisch verschiedenartige Volumenteile vorkommen. So kann das durch eine Kugelfläche definierte Innenvolumen des negativen Elektrons neben geladenen Volumenteilen auch solche Volumenteile umschließen, die energetisch gleichartig mit dem Außenvolumen sind; dies ist sicher dann der Fall, wenn das Elektron keine zentrisch symmetrische Struktur besitzt. Und für das positive Quantum haben wir, solange uns die Erfahrung keine bestimmte Erkenntnis geliefert hat, sogar die Möglichkeit zuzulassen, daß in seinem Innen-

volumen diskrete Teile vorkommen, welche durch wechselseitige Kräfte zu einem Individuum zusammengebunden sind. Von dem chemischen Atom wissen wir endlich mit Bestimmtheit, daß in seinem Innenvolumen diskrete Teile vorkommen, denen wieder je ein Innenvolumen zugeschrieben werden kann.

Auch darf die Definition des Innenvolumens eines elektrischen Quantums oder eines chemischen Atoms nicht das Mißverständnis wachrufen, daß das Innenvolumen eines Individuums eine absolute Größe sei, die unabhängig von jeder Relation (Abstand, Geschwindigkeit) zu anderen Individuen ist; vielmehr haben wir selbst für das negative Elektron und das positive Archion mit der Möglichkeit zu rechnen, daß ihre Innenvolumina mit der Relation zu anderen Quanten sich ändern, also vergrößern oder verkleinern. Da wir das chemische Atom aus diskreten elektrischen Quanten zusammensetzen, so liegt es von vornherein auf der Hand, daß durch die Relation zu anderen Individuen das Innenvolumen des chemischen Atoms sich kontrahieren oder expandieren kann. Der Angabe des Innenvolumens eines physikalischen Individuums müßte also, falls es genau gemessen werden könnte, die Angabe der Relation beigefügt werden, unter der es bestimmt wurde.

Liefert uns unsere bisherige Erfahrung bereits über das Innenvolumen der elektrischen Quanten nur einen sehr beschränkten Aufschluß, so gilt dies noch mehr von dem Außenvolumen. Über die energetische Struktur des Außenfeldes eines Quantums ist weiter unten die Rede; hier sei das Problem der Ausdehnung des Außenvolumens aufgeworfen. Neuartig mag manchem die hier angenommene Auffassung erscheinen, daß ein elektrisches Quantum ein Außenvolumen besitzt, das mit Energie gefüllt ist, und daß es diese an sich gebunden hält, wenn es sich relativ zu anderen Quanten verschiebt. Mit ihren Außenvolumina berühren sich verschiedene Quanten, indem sie in einen und denselben Raumteil gleichzeitig einen Teil ihrer Außenenergie einführen wollen oder wirklich einführen; infolge dieser Raumkonkurrenz üben sie

durch Vermittlung ihrer Außenvolumina Kräfte aufeinander aus. Es erhebt sich nun die Frage, welches die größte lineare Dimension eines elektrischen Quantums ist.

Es liegt auf der Hand, daß wir ebenso wie beim Innenvolumen eine Veränderlichkeit des Außenvolumens zulassen müssen. Die Antwort auf die vorstehende Frage kann demnach nur unter Angabe einer bestimmten Relation des betrachteten Quantums relativ zu anderen Quanten erfolgen. Unter diesem Gesichtspunkt übersehen wir sofort, daß es unsere bisherigen Erfahrungen nicht möglich machen, das Außenvolumen eines Elektrons gegen das Außenvolumen eines positiven Quantums scharf abzugrenzen. Denn wenn wir uns im Experiment ein elektrisches Feld herstellen, indem wir eine endliche Anzahl von negativen Elektronen in einem Aggregat isolieren, so ist uns das nur möglich, indem wir sie von einer gleich großen Anzahl von positiven Quanten abtrennen. Die endlichen unserer Beobachtung sich darbietenden elektrischen Felder liegen also immer zwischen einem Aggregat positiver und einem Aggregat negativer Quanten. Die Summe der maximalen linearen Dimensionen $l_p + l_n$ der Außenvolumina des negativen und des ihm gegenüberstehenden positiven Quantums können wir experimentell dadurch zu ermitteln suchen, daß wir einer Kugelladung eine Kugelladung einander im Abstand $r$ gegenüberstellen, diesen allmählich vergrößern und dabei die elektrische Kraft zwischen $E_p$ und $E_n$ für wachsende Werte von $r$ bestimmen. Solange wir hierbei $\mathfrak{K}_e = \frac{E_p E_n}{r^2}$ finden, können wir sagen, daß $r < l_p + l_n$ ist. Fänden wir schließlich einen Wert von $r$, bei dem die elektrische Kraft kleiner als $\frac{E_p E_n}{r^2}$ sich ergibt, so hätten wir zu schließen, daß er gleich $l_p + l_n$ ist. Dieses Experiment können wir indes nicht bis zu diesem Ende durchführen. Wir finden nämlich zunächst, daß die Relation $\frac{E_p E_n}{r^2}$ bis zu den Dimensionen menschlicher Experimentierräume gilt, bei welchen $\frac{E_p E_n}{r^2}$ bereits so klein ist, daß seine exakte Messung

nicht mehr möglich ist. Wir können daraus schließen, daß die Summe der maximalen linearen Dimensionen der Außenvolumina eines positiven und negativen Quantums, wenn sie völlig bis zum Aufhören der elektrischen Kraft zwischen ihnen getrennt sind, groß relativ zu den der menschlichen Beobachtung zugänglichen Dimensionen, also sehr groß relativ zu den maximalen Dimensionen der Innenvolumina sind. Die Möglichkeit, daß $l_p + l_n$ einen begrenzten, von Unendlich verschiedenen Wert hat, müssen wir zulassen, ferner die Möglichkeit, daß die maximalen Dimensionen der Außenvolumina des positiven und des negativen Quantums ebenso verschieden voneinander sind wie ihre Innenvolumina.

## § 16. Struktur und Energie des elektrischen Feldes des Elektrons und des Archions.

Was die Struktur des Feldes der elektrischen Quanten, speziell des Elektrons betrifft, so hat man bisher vielfach ohne Bedenken auf die Hypothese gebaut, daß innerhalb der Kugel vom Radius $\varrho$ das Innenfeld in allen Richtungen identische Konstitution, also zentrische Symmetrie besitze; hieraus ergab sich dann von selbst, daß auch das äußere Feld zentrische Symmetrie besitze. Die Hypothese der zentrischen Symmetrie des Elektrons ließ man sich dann in zwei spezielle Hypothesen gabeln: entweder baute man weiter auf der Hypothese, daß die Ladung des Elektrons in gleichmäßiger räumlicher Dichte durch das ganze Volumen der Kugel $\frac{4}{3}\varrho^3\pi$ oder in gleichmäßiger Flächendichte über die Kugelfläche $4\pi\varrho^2$ verteilt sei. Diese Art Hypothesen in die Physik einzuführen, entspricht indes mehr dem Bedürfnis, Voraussetzungen für die Anwendung mathemetischer Technik zu gewinnen, als dem Streben, die Erkenntnis aus der Erfahrung zu holen oder sie ihr anzupassen.

Es liegt ja nahe und ist dem menschlichen Denken bequem, von der mit zahlreichen elektrischen Quanten geladenen makroskopischen Kugel, deren zentrisch-symmetrisches Feld wir experimentell beobachten können, auf das Feld des Elementarquantums

zu extrapolieren. Aber diese Extrapolation von der Struktur eines nach menschlichem Bedürfnis gewählten Gebildes aus vielen Quanten auf die Struktur des einzelnen Quantums ist bedenklich, und dem physikalischen Gefühl erscheint die Hypothese einer gleichmäßigen Verteilung der Ladung eines Quantums auf die Oberfläche oder durch das Volumen einer Kugel als künstlich und unnatürlich. Jedenfalls tun wir gut, zunächst mit der Möglichkeit[1]) zu rechnen, daß das Innen- und somit auch das Außenfeld der elektrischen Quanten nicht in allen Richtungen von dem Mittelpunkt weg gleich sei, sondern daß in ihm eine oder mehrere Richtungen (Achsen) hinsichtlich der Verteilung der Energie und somit des elektrischen Kraftflusses ausgezeichnet seien, so daß das einzelne Quantum in bezug auf ein Achsensystem orientiert werden kann. Trifft diese Voraussetzung in Wirklichkeit zu, dann werden zwei einzelne Quanten sowohl ein Drehmoment in bezug auf jene Hauptachsen als auch eine Kraft in ihrer Verbindungslinie aufeinander ausüben. Quantitativ formulierbare Hypothesen über die Struktur des Innen- und Außenfeldes der elektrischen Quanten einzuführen, hat indes so lange wenig Zweck, als nicht solche Beobachtungen wirklich vorliegen oder als möglich vermutet werden können, in welchen die Struktur des Elektrons für eine Erscheinung maßgebend ist.

Nach dem oben gewählten prinzipiellen Standpunkt haben wir sowohl das Innen- wie das Außenvolumen eines elektrischen Quantums mit Energie zu füllen und dieser in den einzelnen Volumenteilen eine derartige raumzeitliche Struktur zu geben, daß daraus die gerichtete oder vektorielle Struktur des Quantenfeldes resultiert, welche die elektrische Kraft zwischen zwei Quanten für einen gewissen Abstand und eine gewisse relative Orientierung ergibt. Die Erfahrungen an dem elektrischen Feld eines Quantenaggregates machen in dieser Hinsicht die Annahme sehr wahrscheinlich, daß die spez. Dichte der Energie im Innen- und Außenvolumen eines elektrischen Quantums nicht überall konstant,

1) J. Stark, Physik. Zeitschr. 8, 881, 1907.

sondern für ein jedes Volumenelement eine Funktion seiner relativen Lage zu dem Mittelpunkt und den Achsen des Quantums ist. Die Energiedichte ist indes keine gerichtete Größe, reicht also zur vektoriellen Charakteristik des elektrischen Quantenfeldes nicht aus. Hierzu kann man die Angaben des Gefälles oder Gradienten der Energiedichte heranziehen, dieser hat eine Größe und eine Richtung im Raume.

Die Erfahrung, daß den elektrischen Quanten und damit der Energie ihres Feldes eine bestimmte Geschwindigkeit, die elementare Geschwindigkeit $c$, eigentümlich ist, legt die Annahme nahe, daß die Energien der verschiedenen Volumenteile eines Quantums relativ zueinander in Bewegung sind. Ist dies zutreffend, so haben wir zu folgern, daß die gesamte zeitlich konstante Energie eines Quantums, das relativ zu anderen ruht, in einer periodischen Bewegung innerhalb des Quantenvolumens begriffen ist; die Periode dieser Bewegung müßte in allen Volumenteilen des Quantums entweder dieselbe sein, oder, kämen in dem Quantenfeld verschiedene Perioden in der Energie bewegung vor, so müßten sie wenigstens in dem Verhältnis von ganzen Zahlen zueinander stehen.

Über die Art der periodischen Bewegung in einem Quantenfeld könnte man z. B. die Annahme machen, daß die Energie im Außenvolumen um gewisse Richtungen, welche auf den Mittelpunkt des Quantums hinweisen, in einer Rotation begriffen ist, die, vom Quantum aus gesehen im Sinn oder entgegengesetzt der Drehung des Uhrzeigers erfolgt. Ohne weiteres würde sich aus dieser Annahme folgendes ergeben. In dem Außenfeld des negativen Elektrons würde die Energierotation z. B. in „negativem" Sinne für einen im Elektron sitzenden Beobachter erfolgen; in dem Außenvolumen des ihm gegenüberstehenden, es anziehenden positiven Quantums, das in einem chemischen Atom gebunden ist, würde die Energierotation für einen Beobachter, der im positiven Quantum sitzt und nach dem Elektron blickt, entgegengesetzt zu der vorhergehenden Beobachtung, also in „positivem" Sinne erfolgen; ein im Elektron oder in dem anziehenden positiven Quantum sitzender Beobachter

würde also die Energierotation des als Sitz dienenden Quantums und diejenige des gegenüberstehenden Quantums in demselben Sinne vor sich gehen sehen in Volumenelementen, die zwischen beiden entgegengesetzt geladenen Quanten liegen. Die Energierotationen zweier sich anziehender elektrischer Quanten in den zwischen ihnen liegenden Teilen der Außenvolumina können also gleichzeitig innerhalb desselben Raumes existieren und sich ineinanderschieben. Dagegen können die Energierotationen zweier Teile des Außenvolumens gleichartiger Quanten nicht gleichzeitig in demselben Teil ihres Zwischenraumes vorhanden sein, sich also nicht ineinanderschieben und so superponieren.

Die vorstehende Auffassung von der Energierotation in den Außenfeldern des positiven und des negativen Quantums soll lediglich eine Andeutung einer Möglichkeit sein, die elektrischen Felder der Quanten durch eine raumzeitliche Struktur von Energie zu beschreiben. Solange die Erfahrung keine Anhaltspunkte für die quantitative Ausarbeitung jener Auffassung bietet, hat es wenig Wert, sie hier weiter auszumalen. Wir übernehmen von ihr für das Folgende lediglich die Vorstellung, daß das elektrische Außenfeld des Quantums durch die Anwesenheit von Energie eine substantielle Existenz besitzt, ferner die Vorstellung, daß Teile der Außenvolumina verschiedener Quanten infolge der vektoriellen Struktur der in ihnen vorhandenen Energie bei der Konkurrenz um denselben Raumteil sich gegenseitig deformieren, indem sie sich gegenseitig aus diesem Raum zu verdrängen suchen oder sich gegenseitig in ihn sich superponierend hineinziehen.

Stehen sich demnach zwei gleichartige Quanten, z. B. zwei negative Elektronen, in solcher relativer Orientierung gegenüber, daß sie sich wechselseitig abstoßen, dann bleiben ihre Außenvolumina räumlich getrennt, und noch weniger ist nach der obigen Anschauung ein Eindringen des Außenvolumens oder Außenfeldes des einen Elektrons in das Innenvolumen des anderen Elektrons möglich. An der Berührungsfläche der Außenvolumina findet zwischen diesen ein sie auseinandertreibender Druck statt. Dadurch, daß die zwei Elektronen bis zur

Berührung ihrer Außenvolumina und noch weiter einander genähert wurden, haben ihre Volumina ausgehend von der Berührungsfläche eine Deformation in allen ihren Teilen erhalten; und zwar hat die Größe und Form des Außen- und Innenvolumens und die raumzeitliche Energiestruktur des Quantums in allen Teilen eine Änderung erfahren, weil alle Teile in einem individuellen Zusammenhang stehen, so daß durch die Deformation der an die Berührungsfläche angrenzenden Volumenteile alle übrigen Teile des einzelnen Quantums in Mitleidenschaft gezogen werden. Nähern wir die zwei gleichartigen Quanten noch weiter, so wächst die Deformation ihrer Struktur; dementsprechend nimmt die abstoßende Kraft zwischen ihnen zu. Die Deformation bei der Annäherung unter wechselseitiger Abstoßung der elektrischen Quanten erfolgt unter Vermehrung der im Quantenfeld vorhandenen Energie von derjenigen Struktur, welche die elektrische Kraft bedingt. Als Maß für die Zunahme der Energie dieser Form oder Struktur kann die Größe der Deformation dienen; zur quantitativen Beschreibung dieser und damit der Zunahme der elektrischen Energie kann die Angabe der relativen Lage der zwei Quanten benutzt werden.

Wir stellen nunmehr ein negatives Elektron einem positiven Quantum zunächst in so großem Abstand einander gegenüber, daß ihre Außenvolumina sich nicht berühren, also keine Kraft aufeinander ausüben und somit frei und unabhängig voneinander sich bewegen können. Dann ist in dem Felde des positiven Quantums und des Elektrons je eine gewisse Energiemenge von bestimmter raumzeitlicher vektorieller Verteilung vorhanden. Nähern wir darauf die zwei Quanten in einer solchen relativen Orientierung einander, daß sie sich wechselseitig anziehen, so superponieren sich ihre benachbarten Volumenteile einander, indem sie sich gegenseitig so deformieren, daß sie gleichzeitig in demselben Raumteil existieren können. Und wie in dem vorigen Fall pflanzt sich die Deformation in alle Teile des Quantenfeldes fort infolge ihres individuellen Zusammenhanges untereinander; die Richtung der Deformation ist indes nun-

mehr entgegengesetzt zu derjenigen im vorigen Fall. Während zwei gleichartige Quanten aus den zwischen ihnen liegenden Raumpartien wechselseitig ihre Energie fortdrängen auf ihre einander abgewandten Seiten, zerren zwei ungleichartige Quanten gegenseitig ihre Energie in die zwischen ihnen liegenden Raumpartien hinein von ihren einander abgewandten Seiten fort. In beiden Fällen ist die Verteilung der Energie des einzelnen Quantums dissymmetrisch in bezug auf die Ebene durch den Quantenmittelpunkt normal zu der Geraden durch die Mittelpunkte der zwei Quanten; indes ist das Vorzeichen der Dissymmetrien in den zwei Fällen entgegengesetzt. Die Erfahrung lehrt, daß bei der wechselseitigen Deformation der Felder zweier ungleichartiger Quanten die Menge der Quantenenergie von derjenigen Form, welche die elektrische Kraft bedingt, mit wachsender Deformation, also mit abnehmendem Abstand der Quanten, kleiner wird; auch in dieser Hinsicht ist also die relative Deformation zweier gleichartiger Quanten dem Vorzeichen nach verschieden von der relativen Deformation zweier ungleichartiger Quanten.

Die Änderung der elektrischen Energie zweier ungleichartiger Quanten bei Änderung ihres Abstandes läßt sich, wenn wir absehen von dem möglichen Einfluß der relativeu Orientierung ihrer Achsen, quantitativ durch Angabe ihrer relativen Lage beschreiben. Das Minimum von elektrischer Energie haben ein Archion und ein Elektron zueinander, wenn ihre relative Lage derartig ist, daß ihre wechselseitige elektrische Kraft Null geworden ist. Diese Lage minimaler Energie bezeichnen wir als die normale relative Lage oder Konfiguration; die für diese in dem Feld der zwei Quanten vorhandene elektrische Energie nennen wir normal und benutzen sie als Nullpunkt für die Messung der bei einer anderen Konfiguration oder einem anderen Abstand der zwei Quanten an diesen vorhandenen Energie. Bei Änderung der normalen relativen Lage des Elektrons zu seinem Archion, also bei Vergrößerung ihrer relativen Entfernung, wächst die relative elektrische Energie der zwei Quanten, die Zunahme erreicht ein Maximum $V$, wenn das Elektron unabhängig von seinem Archion frei beweglich, oder mit anderen

Worten, wenn es von seinem Archion abgetrennt wird. Die maximale Zunahme $V$ der elektrischen Energie nennen wir die maximale potentielle oder kurz elektrische Energie des Systems Elektron-Archion. Wir können aus der Erfahrung lediglich den Wert von $V$ ermitteln; er stellt die Zunahme der elektrischen Energie des Archions und derjenigen des Elektrons dar; ob die zwei Zunahmen gleich oder verschieden groß sind, wissen wir nicht.

Das vorstehende Experiment über räumliche Relation zwischen einem negativen Elektron und einem Archion ist nur ein gedachtes Experiment, das wir zu dem Zweck analysiert haben, um jene Relation für den denkbar einfachsten Fall zu beschreiben. Es läßt sich deshalb nicht realisieren, weil wir ein Archion nicht abgetrennt von einem chemischen Atom für sich allein zur Reaktion auf ein negatives Elektron bringen können. Denn in den Atomen aller chemischen Elemente, mit Ausnahme vielleicht des Wasserstoffes, sind zu Individuen mehrere positive Archionen zusammengebunden, zwischen welche oder an welche zur Neutralisierung ihrer Ladung nach außen gleich viele negative Elektronen gelagert sind. Und da das chemische Atom als Individuum zu betrachten ist, so ist die räumliche Relation zwischen einem Elektron und den benachbarten Archionen beeinflußt durch alle übrigen Teile des Atoms, und eine Änderung jener räumlichen Relation bei der Verschiebung des Elektrons relativ zu seiner normalen Lage im Atom beeinflußt ihrerseits wieder alle übrigen Teile des Atoms, wenn auch dieser Einfluß, der in einer Änderung der an die übrigen Teile geknüpften Energie besteht, relativ zu deren Gesamtenergie nur gering sein kann. Wir können also experimentell nicht die potentielle Energie des abgetrennten, freibeweglichen Elektrons in bezug auf ein positives Archion, sondern lediglich die elektrische oder potentielle Energie eines Elektrons in bezug auf seine normale Lage im Innern oder an der Oberfläche des Atoms ermitteln, wenn sich dieses unter wohldefinierten Umständen befindet, also z. B. für sich allein ist und noch kein anderes Elektron verloren hat oder bereits ein Elektron verloren hat oder in einer räumlichen Relation zu anderen Atomen steht, z. B. in

ein mehratomiges Gasmolekül eingebaut ist. Diese räumliche Relation der Elektronen eines Atoms zu dessen Archionen und zu denen anderer Atome, sowie ihre energetische Charakteristik muß in einer besonderen Schrift eingehend behandelt werden. Wir beschränken uns darum auf die im Vorstehenden entwickelte prinzipielle Auffassung von der Deformation der raumzeitlichen Verteilung der Energie eines elektrischen Quantums durch die räumliche Konkurrenz mit dem Energiefelde eines zweiten gleichartigen oder ungleichartigen Quantums.

Zur Begründung der prinzipiellen Stellung in der Physik, welche wir oben der Energie zuwiesen, sei hier noch bemerkt, daß, wie bereits oben angedeutet wurde, die elektrische Kraft auf ein elektrisches Quantum, auf eine raumzeitliche Verteilung von Energie[1]), die uns freilich vorderhand unbekannt ist, zurückgeführt werden kann. Es läßt sich nämlich zunächst die Bewegungsgröße der Volumeneinheit aus der Kenntniss der Energieströmung ableiten. Die Kraft auf das Innere einer geschlossenen Fläche läßt sich dann weiter darstellen als das Integral einer Strömung der Bewegungsgröße über die Fläche, welche das Außenvolumen des Quantums schneidet, das Innenvolumen vollständig umhüllt. Das Quantum erfährt in derjenigen, Richtung eine elektrische Kraft, in welcher die Hauptachse dieses Oberflächenintegrals von ihm fortweist. Die Größe dieser Kraft wird von der relativen Lage zu anderen Quanten und der Art der Energieströmung und ihrem individuellen Konnex im Quantenfeld bedingt; zur quantitativen Beschreibung dieser Art und dieses individuellen Konnexes haben wir die Definition der elektrischen Ladung auf Grund der Messung der elektrischen Kraft eingeführt; in ihr kommt die individuelle raumzeitliche Energiestruktur eines elektrischen Quantums bei der räumlichen Relation zu anderen Quanten zum Ausdruck.

Nachdem oben wenigstens die Möglichkeit, dem inneren und äußeren Energiefeld des Elektrons eine vektorielle Struktur zuzu-

---

1) Vgl. M. Planck, Verh. d. D. Phys. Ges. **18**, 728, 1908.

weisen, angedeutet worden ist, seien hier einige Überlegungen allgemeiner Natur eingeschaltet.

Die physikalischen Größen werden in der Regel in zwei große Gruppen geordnet: die Skalare besitzen eine Maßzahl und ein Vorzeichen, die Vektoren eine Maßzahl und eine Richtung im Raum. Daneben ist noch das Tensortripel zur Charakteristik eines Spannungszustandes in einem Medium und die Temperatur zur Charakteristik des thermodynamischen Zustandes definiert worden. Mit Bewußtsein und Absicht wurde in dieser Schrift der Begriff des physikalischen Individuums oder Atoms eingeführt.

Wie nun oben dargelegt wurde, haben wir dem Elektron, Archion und somit auch dem chemischen Atom eine raumzeitlich gerichtete Struktur in seinem Innen- und Außenvolumen zuzuerkennen; wir können sie aus diesem Grunde als Vektorindividuen bezeichnen.

Die Gesetze der Kräfte auf ein elektrisches Vektorindividuum in einem endlichen elektrischen und magnetischen Vektorfeld haben wir oben erst hypothetisch abgeleitet und dann experimentell bestätigt.

Die Gesetze der Kräfte zwischen zwei relativ ruhenden oder bewegten endlichen vektoriellen Aggregatfeldern auf zwei Vektorindividuen übertragen, würde heißen, diesen dieselbe Struktur wie jenen zuzuerkennen. Noch weniger begründet wäre es, die Gesetze zwischen Aggregaten oder die erst zu ermittelnden Gesetze zwischen Vektorindividuen auf die Teile des einzelnen Individuums anzuwenden.

Es wird heilsam sein und der Entwicklung der Forschung dienen, wenn wir am Schlusse dieses Abschnittes ehrlich gestehen, daß uns Kenntnisse über die wirkliche Form und Ausdehnung der Felder der elektrischen Quanten, über die wirkliche raumzeitliche Energieströmung in ihnen jedenfalls vorderhand fehlen. Damit hängt zusammen, daß wir auch nichts Sicheres wissen, wie die elektrische Kraft zwischen zwei einzelnen elektrischen Quanten von ihrem Abstand und der relativen Lage ihrer möglichen

Strukturachsen abhängt. Ferner ergibt sich hieraus, daß uns die Dynamik zweier einzelner relativ zueinander bewegter elektrischer Quanten jedenfalls vorderhand theoretisch und experimentell unzugänglich ist. Dieser Mangel an Kenntnis der Struktur der Quanten macht es uns auch unmöglich, aus ihr die Wirkungsweise des einzelnen Quantums bei der Emission und Absorption von Energie während einer Beschleunigungsperiode und das Integral- oder gar Differentialgesetz dieser Energievariation abzuleiten. Aus dem gleichen Grunde ist es nicht möglich, deduktiv aus der Kenntnis der Struktur des positiven und des negativen Quantums durch eine raumzeitliche Zusammenlagerung einer Anzahl von positiven und negativen Quanten die individuellen Strukturen zu gewinnen, als welche wir die chemischen Atome zu betrachten haben.

Diese Unkenntnis der prinzipiellen Eigenschaften der elektrischen Quanten mag uns bedrücken; sie ist indes in der Natur des Objekts und in den Beobachtungsmethoden des menschlichen Subjekts begründet. Und es erscheint fraglich, ob es uns überhaupt gelingen wird, aus der Erfahrung Kenntnis von jenen letzten Dingen der Physik zu gewinnen, und ob die menschliche Denktechnik ausreichen wird, die raumzeitliche Struktur des positiven und negativen Quantums von Volumen- zu Volumenelement im Individualkonnex zu erfassen.

## § 17. Atomistische Struktur und Energie des elektrischen Feldes eines Quantenaggregats.

Wie bereits oben dargelegt wurde, stellen wir uns ein endliches elektrisches Feld her, indem wir gegenüber einer endlichen Zahl von positiven Quanten in endlichem Abstand eine gleich große Anzahl negativer Quanten anordnen. Liegen hierbei alle positiven Quanten auf einer und derselben Leiterfläche (Belegung) und ebenso alle negativen Quanten auf einer zusammenhängenden Leiterfläche, so heißen wir die Anordnung einen elektrisch geladenen Kondensator. Lassen wir die relative Lage der Belegungen des Kondensators ungeändert und ändern wir die elektrische La-

dung ($E_p$ und $E_n$) seiner Belegungen, so ändert sich auch die Spannungsdifferenz $V$ zwischen seinen Belegungen, d. h. die elektrische Arbeit, die geleistet wird, wenn die Einheit positiver Ladung von der negativen nach der positiven Belegung übergeführt wird. Indes bleibt das Verhältnis $C = \frac{E}{V}$, so lange konstant, als nicht die Konfiguration des Kondensators geändert wird; $C$ definieren wir als die Kapazität des Kondensators. Im Kondensator besitzen die Ladungen $E_p$ und $E_n$ eine gewisse elektrische oder potentielle Energie in bezug aufeinander; als normale relative Konfiguration der Ladungen wird bei der Definition dieser Energie stillschweigend die relative Lage angenommen, welche die in $E_p$ und $E_n$ enthaltenen Quanten besitzen, wenn sie in einem Leiter als Ionen gleichmäßig gemischt sind. In bezug auf diese normale Lage ist die Zunahme ihrer relativen elektrischen Energie, wenn sie auf die Belegungen des Kondensators von der Kapazität $C$ gebracht werden, gleich

$$U_e = \frac{1}{2} V E = \frac{1}{2} C V^2.$$

Nach der üblichen Vorstellung ist das elektrische Feld eines Kondensators überall zwischen den Belegungen und selbst zwischen Ladungsquanten auf den Belegungen bis in die kleinsten Dimensionen hinein kontinuierlich, insofern es einen Deformationszustand des vollkommen kontinuierlichen Mediums Äther darstellt. Nach der hier gewählten Vorstellung bietet sich das elektrische Feld in einem Kondensator nur in solchen zeitlichen und räumlichen Dimensionen, die groß sind relativ zu denjenigen der Quanten, als kontinuierlich dar. Innerhalb kleiner Dimensionen ist das endliche elektrische Feld in der Nähe der Belegungen diskontinuierlich, da hier die Außenvolumina der gleichartigen Quanten sich räumlich nicht ineinander, sondern nebeneinander lagern; dagegen findet nach den obigen Vorstellungen ein kontinuierlicher Übergang von positiven in negative Quantenfelder in einigem Abstand von den Belegungen statt; die Energie des Kondensators bleibt für eine summarische Beobachtung während endlicher Zeiten konstant,

wenn auch in der Superposition der Felder ungleichartiger Quanten ein Wechsel stattfindet, solange nur $E$ und C konstant sind.

Die Aggregate gleich vieler positiver und negativer Quanten können gleichmäßig in einem Volumen gemischt sein und so der Beobachtung in endlichen zeitlichen und räumlichen Dimensionen als ein Medium sich darstellen. Dessen Volumen setzt sich dann in Wirklichkeit für einen elementaren Beobachter aus den diskontinuierlichen Quantenfeldern zusammen; Diskontinuität hat vor allem zwischen benachbarten gleichartigen Quanten statt, dagegen können die Felder benachbarter ungleichartiger Quanten kontinuierlich ineinander überfließen und somit Zusammenhang untereinander haben. Aus der relativen Zusammenlagerung der Quantenfelder, also in letzter Linie aus der elektrischen Kraft zwischen einzelnen elektrischen Quanten resultiert eine Reihe von Eigenschaften und Gesetzen der materiellen Medien, so der Aggregatzustand (gasförmig, flüssig, kristallinisch), die elastischen und elektromagnetischen Mediumqualitäten. Innerhalb eines von ihnen konstituierten Mediums ist die potentielle Energie der Quantenfelder mit ihrer relativen Anordnung und darum mit dem Zustand des Mediums variabel; dessen potentielle Energie kann relativ zu einem normalen Zustand verändert werden; die Änderung der potentiellen Energie ist entweder für alle an ihr teilnehmenden Quantenfelder gleich groß oder in der Weise ungeordnet, daß sich nur ein Mittelwert definieren läßt. Deformation oder Änderung des Zustandes eines materiellen Mediums bedeutet demnach im letzten Grund Deformation der Energiefelder der in ihm enthaltenen elektrischen Quanten. Dies gilt von allen materiellen Medien; denn alle enthalten chemische Atome, und diese setzen sich wieder aus elektrischen Quanten zusammen. Die Zurückführung von Mediumqualitäten auf eine räumliche Relation von elektrischen Quantenfeldern muß Aufgabe einer besonderen Untersuchung sein. Hier sei noch folgende prinzipielle Überlegung angestellt.

Wie oben dargelegt wurde, ist es wahrscheinlich, daß eine geschlossene Kugelfläche, welche die Innenvolumina eines sich anziehenden Paares ungleichartiger Quanten unter Berührung umhüllt,

wohl einen großen Teil der gesamten Energie der zwei Quanten, aber nicht die gesamte Energie einschließt, da außer ihr noch Teile der Außenvolumina der zwei Quanten liegen. Diese Überlegung haben wir auf ein Aggregat von gleich vielen positiven und negativen Quanten zu übertragen, die in einem materiellen Medium gleichmäßig miteinander gemischt sind. Wir legen um das Aggregat eine geschlossene Fläche, welche sämtliche Quanten einschließt und die Innenvolumina der an der Peripherie des Aggregats liegenden Quanten berührt. Diese Fläche umschließt das Innenvolumen oder schlechtweg das Volumen des Aggregats und heißt dessen Oberfläche. Der durch sie tretende gesamte elektrische Kraftfluß ist zwar Null, wenn das Aggregat elektrisch ungeladen ist, auch umschließt sie den größten Teil der elektrischen Feldenergie der eingeschlossenen Quanten. Indes treten Teile des Außenvolumens und damit Teile der elektrischen Außenfelder der Quanten durch die Oberfläche eines Quantenaggregats heraus. Diesem haben wir darum nicht bloß ein Innenvolumen, sondern auch ein Außenvolumen zuzuweisen; in ihm sind die Außenvolumina gleichartiger Quanten diskontinuierlich nebeneinander, die benachbarten Außenvolumina ungleichartiger Quanten ineinander gelagert. Die Struktur des elektrischen Außenfeldes eines neutralen Quantenaggregates ist für das menschliche Vorstellungsvermögen ebenso reich und kompliziert wie diejenige des Innenfeldes. Ein im Außenfelde arbeitender elementarer Beobachter würde in elementaren Zeiten und Dimensionen den buntesten Wechsel in der raumzeitlichen Struktur des äußeren Energiefeldes wahrnehmen. Benachbarte Quantenaggregate (materielle Körper), deren Innenvolumina durch scheinbar leere Zwischenräume getrennt sind, grenzen mit ihren Außenvolumina aneinander, oder es durchdringt vielmehr jedes Aggregat mit seinem Außenvolumen das Außen- und auch das Innenvolumen jedes anderen Aggregats. Diese Vorstellung eines Außenvolumens als einer raumzeitlich ungeordneten Zusammenlagerung äußerer Energiefelder elektrischer Quanten legt uns zwei Fragen vor. Die erste bezieht sich auf die Ausdehnung des Außenvolu-

mens eines materiellen Körpers; wir haben vorderhand noch keinen experimentellen Anhalt zu ihrer Beantwortung. Zweitens erhebt sich die Frage, ob nicht ein elektrisch neutraler Körper, wenn sein Außenvolumen das Außen- und das Innenvolumen eines zweiten Körpers durchdringt, auf diesen eine Kraft ausübt und von seiner Seite erfährt. Auf diese Frage wird weiter unten näher eingegangen werden.

## § 18. Struktur und Maß der translatorischen Energie elektrischer Quanten.

Wie im Vorstehenden dargelegt wurde, kann die Form und Energie des Feldes elektrischer Quanten durch Änderung ihrer relativen Lage geändert werden. Beim Vergleich der elektrischen Energie zweier verschiedener relativer Lagen ist angenommen, daß die Quanten in den beiden Lagen relativ zueinander ruhen; solange die relative Lage der Quanten konstant bleibt, ist dies auch für ihre potentielle oder elektrische Energie der Fall.

Die Form und Energie des Feldes eines elektrischen Quantums kann nun außer durch die räumliche Konkurrenz mit einem relativ ruhenden anderen Quantum noch in anderer Weise geändert sein, nämlich dadurch, daß es relativ zu dem anderen Quantum in Bewegung ist.

Um die Bewegung relativ zu einem Beobachter zu beschreiben, nehmen wir einerseits ein System dreier Achsen an, die relativ zu dem Beobachter ruhen, das „ruhende Achsensystem"; andererseits verbinden wir mit bestimmten Elementen des bewegten Energievolumens drei Achsen, die „bewegten Achsen", die sich zusammen mit den ihnen zugeordneten Energieelementen relativ zu einem Beobachter bewegen können. Wir unterscheiden zwei Hauptfälle von Bewegung und betrachten sie zunächst gesondert für sich.

Der erste Fall von Bewegung, die Translation, liegt vor, wenn der Schnittpunkt der Achsen im bewegten Quantum relativ zu dem Schnittpunkt der ruhenden Achsen des Beobachters sich verschiebt und dabei die Winkel zwischen

den zwei Achsensystemen zeitlich unverändert bleiben. Der zweite Fall, die Rotation, liegt vor, wenn eine Punktreihe oder Achse im bewegten Volumen, die „Rotationsachse", relativ zu den ruhenden Achsen ihre Lage nach Richtung und Abstand zeitlich unverändert behält, dagegen sie schneidende Achsen des bewegten Volumens ihre Winkel gegen die ruhenden Achsen ändern. Der allgemeine Fall von Bewegung relativ zu einem Beobachter liegt vor, wenn das Energievolumen relativ zu dessen ruhenden Achsen gleichzeitig eine Translation und eine Rotation ausführt.

Wir betrachten zunächst den ersten Hauptfall, die translatorische Bewegung. Die räumliche Reihenfolge der Orte eines Elementes des translatorisch bewegten Energievolumens erscheint dem Beobachter als gerade Strecke. Es sei, gemessen in dem ruhenden Achsensystem, $dl$ eine solche Strecke, welche ein bestimmtes Volumenelement, in einer Zeitdauer $dt$, gemessen im ruhenden System, durchläuft; $\mathfrak{v} = \frac{dl}{dt}$ definieren wir dann als die Translationsgeschwindigkeit oder kurz als die Geschwindigkeit des bewegten Energievolumens oder elektrischen Quantums relativ zu dem Beobachter. Wir beschränken die weitere Betrachtung auf den Fall, daß $\mathfrak{v} = \text{const}$ ist, daß also das bewegte Energiefeld als Ganzes relativ zu dem Beobachter keine Geschwindigkeitsänderung oder Beschleunigung erfährt. Wir richten unser Augenmerk zunächst auf die Änderung der gesamten Energie eines elektrischen Quantums infolge der translatorischen Bewegung.

Daß ein Bündel gleich schneller Kathodenstrahlen infolge ihrer Relativgeschwindigkeit $\mathfrak{v}$ Energie besitzt, können wir in folgender Art nachweisen. Wir lassen es während einer gewissen Zeit auf einen relativ zu uns ruhenden Körper auffallen und richten die Versuchsbedingungen so ein, daß die ganze von ihnen abgegebene Wärme in dem Körper in die Form von Wärme übergeführt wird. Ist die während der Beobachtungsdauer im Körper entwickelte Wärme $U_w$, gemessen in Erg, und die an den Körper abgegebene elektrische Ladung $E$, so ist die Energiemenge, welche von dem einzelnen Strahlenteilchen beim Verlust der Relativ-

geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ abgegeben wird, gleich $\frac{U_w \cdot e}{E}$. Messen wir andererseits die Ablenkung der Strahlen durch ein elektrisches und magnetisches Feld, so erhalten wir $m$ und $\mathfrak{v}$.

Gemäß den Lehren des Relativitätsprinzips (§ 19) können wir nun die Größe $m_0 c^2$ in nachstehender Gleichung als die an dem einzelnen Kathodenstrahlteilchen lokalisierte Energie für den Fall betrachten, daß das Elektron relativ zu dem Beobachter ruht und frei beweglich ist, also in großem Abstand von positiven Quanten sich befindet; die Größe

$$m c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}}$$

definieren wir als die Energie, welche an dem Elektron lokalisiert ist, wenn es die Relativgeschwindigkeit $\mathfrak{v}$ besitzt. Die Differenz

$$\frac{m\ c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}} - m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}\right] = u_k,$$

oder die Energie, welche das Elektron abgibt, wenn seine Relativgeschwindigkeit von $\mathfrak{v}$ auf Null gebracht wird, definieren wir als die translatorisch kinetische oder translatorische Energie des Elektrons.

Vergleichen wir nun $u_k$ mit $\frac{U_w \cdot e}{E}$, so finden wir Übereinstimmung zwischen den zwei Werten. Der obige Ausdruck für $u_k$ läßt sich in eine Reihe nach Potenzen von $\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2$ entwickeln; ist $\mathfrak{v}$ klein gegen $c$, so können wir die Entwicklung hinter dem ersten Glied abbrechen und erhalten dann als Näherungsformel für die translatorische Energie den Ausdruck

$$u_k = \frac{1}{2} m_0 \mathfrak{v}^2 .$$

Nachdem wir den Nachweis für das Vorhandensein von translatorischer Energie erbracht und als Maß für sie die ruhende Masse $m_0 = m_{v=0}$ und das Quadrat der Relativgeschwindigkeit eingeführt

haben, versuchen wir, eine Vorstellung von der Deformation des Energiefeldes eines Elektrons durch die Relativbewegung zu gewinnen.

Ein Elektron möge relativ zu einem Punkte in einem beobachtenden Aggregatfeld die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ besitzen; in einem bestimmten Zeitmoment sei sein Abstand von dem Bezugspunkt $\mathfrak{r}$. Wir nehmen nun an, wir könnten die Struktur des Feldes des Elektrons so rasch ermitteln, daß während der Beobachtungsdauer der Abstand $\mathfrak{r}$ der Richtung und Größe nach als konstant betrachtet werden kann. Wir würden dann eine andere raumzeitliche Struktur finden, als wenn der Abstand $\mathfrak{r}$ dauernd konstant ist. Durch die Relativbewegung ist also die raumzeitliche Struktur des Energiefeldes des Elektrons relativ zu ihrer Form im Zustand der relativen Ruhe deformiert; die durch $\frac{\mathfrak{v}}{c}$ gemessene Deformation ist bedingt durch die Aufnahme der translatorischen Energie; der Formdifferenz der zwei Zustände entspricht als ihre Energiedifferenz die translatorische Energie.

Insofern die raumzeitliche Struktur des Feldes des ruhenden Elektrons bereits vektoriellen Charakter hat, muß auch die Deformation durch die Relativbewegung an jedem Orte des Elektronenfeldes eine Größe und Richtung haben. Aus Symmetriegründen läßt sich über sie folgendes schließen.

Die Richtung der translatorischen Deformation kehrt sich in allen Volumenelementen des Elektronenfeldes um, wenn die Richtung von $\mathfrak{v}$ sich umkehrt. Ist die Richtung von $\mathfrak{v}$ bereits eine Symmetrieachse des Elektronenfeldes, wenn $\mathfrak{v}$ Null ist, so ist sie auch eine Symmetrieachse der translatorischen Deformation des Elektronenfeldes. Die Größe der kinetischen Deformation des Elektronenfeldes nimmt mit zunehmendem normalen Abstand von der Richtung von $\mathfrak{v}$ ab, wenn dies auch die elektrische Energie des Volumenelements tut. Infolge des individuellen Zusammenhanges der Teile des Elektrons verteilt sich die Energie der translatorischen Deformation auf alle Teile, also sowohl auf das Außen- wie auf das Innenvolumen. Es ist

wahrscheinlich, daß durch die Relativbewegung nicht bloß die Form, sondern auch die Größe der zwei Volumina verändert wird.

Solange wir die raumzeitliche Struktur des Energiefeldes des relativ ruhenden Elektrons nicht kennen, können wir auch über die Struktur des Feldes des bewegten Elektrons keine detaillierten Folgerungen ziehen.

Wir können die Definitionen der translatorischen Deformation und Energie, die wir an dem Fall des Elektrons entwickelt haben, ohne weiteres auf das positive Atomion und das neutrale Atom ausdehnen.

Die $\alpha$-Strahlen, also die Heliumatomionen eines bestimmten radioaktiven Elements, bringen wir während einer bestimmten Zeit in einem Körper zur Absorption, reduzieren also ihre relative Geschwindigkeit von $\mathfrak{v}$ auf Null. Wir bestimmen erstens die dabei von ihnen in Form von Wärme abgegebene Energiemenge $U_w$, zweitens ihre Anzahl $n$ und drittens mittels elektromagnetischer Ablenkung ihre Masse $m$ und ihre relative Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$. Für die von dem einzelnen Atomion abgegebene Energiemenge gilt dann wieder die Gleichung

$$u_k = \frac{U_w}{n} = \frac{1}{2} m_0 \mathfrak{v}^2,$$

indem wir statt der genauen Formel die Näherungsformel wegen der Kleinheit von $\mathfrak{v}$ relativ zu $c$ setzen. Die Größe

$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}\right]$$

bzw. $\frac{1}{2} m_0 \mathfrak{v}^2$ definieren wir auch in diesem Falle als die translatorische Energie des frei für sich beweglichen Atomions.

Die für den Fall des Elektrons und des positiven Atomions experimentell begründete Definition der translatorischen Energie wollen wir auch auf das chemische Atom anwenden. Es sei also dessen translatorische Energie durch den Ausdruck



$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2}\right]$$

bzw. $\frac{1}{2} m_0 \mathfrak{v}^2$ gegeben, wenn das Atom relativ zu anderen Atomen frei beweglich ist und die relative Translationsgeschwindigkeit $\mathfrak{v}$ besitzt.

Die translatorische Energie eines chemischen Atoms haben wir auf die Innen- und Außenfelder seiner Elektronen und Archionen zu verteilen. Diese nehmen alle in ihr Innen- und ihr Außenfeld translatorische Energie auf; deren Menge ist aber im allgemeinen nicht dieselbe wie in dem Falle, daß das Elektron oder Archion frei für sich allein beweglich ist. Denn die ruhenden elektrischen Energiefelder sind in den zwei Fällen voneinander verschieden und darum auch ihre translatorischen Deformationen. Von dem frei für sich beweglichen Elektron müssen wir ja annehmen, daß die raumzeitliche Struktur und Menge seiner elektrischen Energie verschieden ist von derjenigen in dem Falle, daß das Elektron durch ein benachbartes, es bindendes Archion deformiert ist. Ebenso hängt die Menge der translatorischen Energie der in dem Atom vorhandenen sich wechselseitig und in bezug auf Elektronen deformierenden Archionen ab von der Konfiguration des Atoms. Da durch diese der Energieinhalt des Atoms bedingt ist, so ist ohne weiteres ersichtlich, daß die translatorische Energie und gemäß dem Nachstehenden auch die Masse eines Atoms abhängt von seinem Inhalte an potentieller Energie.

## § 19. Relativitätsprinzip, Beziehung zwischen Energie und Masse.

Das Relativitätsprinzip bezieht sich nicht speziell auf die elektrischen Quanten. Wenn hier gleichwohl etwas ausführlicher auf seinen Inhalt eingegangen wird, so geschieht dies deswegen, weil in dieser Schrift öfter darauf Bezug genommen wird und weil es

an den Strahlen elektrischer Quanten eine experimentelle Bestätigung erfahren hat.

Bei der Translation eines Energievolumens, speziell des Elektrons, haben wir zunächst angenommen, daß die Elemente des Volumens relativ zueinander ruhen und haben die translatorisch kinetische Energie als die Energiezunahme relativ zu der Energiemenge für die Geschwindigkeit Null definiert. Diese Energiezunahme ist darum in dem System vorhanden, welches die beobachtenden Körper und das relativ zu ihnen bewegte Energiefeld umfaßt. Dem einen oder anderen Teil dieses Systems ist es für sich allein nicht möglich, die translatorisch kinetische Energie zwischen seinem eigenen Energiefeld und dem beobachteten bewegten Energiefeld zu teilen.

In einem Energiefeld sollen zwischen seinen Teilen Ereignisse, also Relativbewegungen, sich abspielen; die Teile sollen hierbei alle dieselbe Translationsgeschwindigkeit relativ zu einem zweiten, beobachtenden Energiefeld besitzen. Dieser Fall und die Vorstellung, daß infolge der Translation die raumzeitliche Struktur eines Energiefeldes geändert wird, stellen uns vor die Frage, ob der Verlauf und das Gesetz eines physikalischen Vorganges oder mit anderen Worten die Relation zwischen physikalischen Größen innerhalb des einen Energiefeldes für einen ihm angehörigen Beobachter sich ändert mit der Relativgeschwindigkeit zu einem anderen Energiefeld. Diese Frage kann nur durch die Erfahrung beantwortet werden. Würde die Antwort in positivem Sinne ausfallen, so wäre es einem nur innerhalb des eigenen Energiefeldes messenden Beobachter möglich, eine Translationsgeschwindigkeit für sich der Größe und Richtung nach zu bestimmen.

Es mußte Aufgabe des messenden Experiments sein, eine Antwort auf die aufgeworfene Frage zu geben. Von mehreren Forschern wurden Versuche darüber angestellt, ob eine elektromagnetische Relation einmal in der Richtung der Translationsgeschwindigkeit $\mathfrak{v}$ der Erde, das andere Mal, senkrecht dazu beobachtet, eine Differenz in den zwei Richtungen aufweist. Soweit diese Versuche genau waren, haben sie alle das Resultat ergeben,

daß die beobachteten Relationen jedenfalls nicht eine Funktion der ersten Potenz des Verhältnisses $\frac{\mathfrak{v}}{c}$ sind. Insbesondere hat hat Michelson[1]) eingehende Versuche in dieser Richtung angestellt und zwar hat er untersucht, ob die Fortpflanzung des Lichtes, das wir ja als einen elektromagnetischen Vorgang zu betrachten haben, in der Richtung der Erdtranslation mit einer anderen Geschwindigkeit verläuft als senkrecht dazu. Er trieb die Genauigkeit seiner Versuchsanordnung so weit, daß er schließlich sicher nachweisen konnte, daß der Gangunterschied des Lichtes auf den Wegen in den zwei Richtungen auch unabhängig von der zweiten Potenz des Verhältnisses $\frac{\mathfrak{v}}{c}$ ist.

Das negative Resultat dieser Versuche veranlaßte H. A. Lorentz[2]) und Fitzgerald[3]) zur Aufstellung der Hypothese, daß infolge der relativen Translation die Längen materieller Körper in der Translationsrichtung eine Änderung relativ zu ihrem Betrage senkrecht dazu erfahren. Ausgehend von dieser Hypothese führte dann Lorentz[4]) in die elektromagnetische Theorie solche Transformationen ein, daß sich elektromagnetische Relationen unabhängig von einer konstanten relativen Translationsgeschwindigkeit ergaben. A. Einstein[5]) hat dann diese Idee verallgemeinert und systematisch die Konsequenzen aus dem Postulat gezogen, daß die Relation physikalischer Größen eines Energiefeldes unabhängig von der konstanten relativen Translationsgeschwindigkeit $\mathfrak{v}$ sich ergibt, wenn die Größen nur alle von einem dem Energiefeld selbst an-

---

1) A. A. Michelson, Amer. Journ. of Science **22**, 20, 1881; A. A. Michelson and E. W. Morley, Amer. Journ. of Science **34**, 333, 1887.

2) H. A. Lorentz, Zittingsverslagen d. Akad. v. Wet. Amsterdam 1892—93, p. 74.

3) Vgl. H. A. Lorentz, Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern p. 122.

4) H. A. Lorentz, Versl. Akad. Wet. Amsterdam 1904.

5) A. Einstein, Ann. d. Phys. **17**, 891, 1905; **18**, 639, 1905; **20**, 627, 1906; **21**, 583, 1906; **23**, 197, 371, 1907. Zusammenfass. Ber.: Jahrb. d. Rad. u. El. **4**, 411, 1908.

gehörenden Beobachter oder von einem zweiten Energiefeld aus, gegen das die Relativgeschwindigkeit $\mathfrak{v}$ vorhanden ist, gemesssen werden. Die Relation der Koordinaten des Raumes ($x$, $y$, $z$ bzw. $x'$, $y'$, $z'$) und der Zeit ($t$ bzw. $t'$) für ein Punktereignis in dem ruhenden bzw. bewegten System gewann Einstein durch die Festsetzung, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $c$ des Lichtes sich identisch ergeben soll, mag sie in den Maßzahlen von $x, y, z, t$ oder in den Maßzahlen von $x'$, $y'$, $z'$, $t'$ bestimmt werden.

Es ist nicht möglich, hier die Konsequenzen des Lorentz-Einsteinschen Relativitätsprinzips darzustellen; es kann, wie Planck[1]) und Minkowski[2]) gezeigt haben, als Grundlage einer allgemeinen Dynamik dienen. Für die vorliegende Schrift kommt spezieller die Folgerung über die Masse aus jenem Prinzip in Betracht.

Als longitudinale Masse eines Körpers werde diejenige definiert, welche in Reaktion tritt, wenn der Körper in der Richtung seiner Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ eine Beschleunigung erfährt, als transversale Masse diejenige bei einer Beschleunigung senkrecht zur Richtung seiner Geschwindigkeit. Die Masse für $\mathfrak{v} = o$ sei $m_o$. Gemäß dem Relativitätsprinzip ist dann die longitudinale Masse

$$m_l = m_o \left[1 - \left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2\right]^{-3/2},$$

die transversale Masse

$$m_t = m_o \left[1 - \left(\frac{\mathfrak{v}}{c}\right)^2\right]^{-1/2}.$$

Aus diesen Formeln ist zu ersehen, daß die Masse eines Körpers eine Funktion seiner Geschwindigkeit ist. Sie zeigen auch, daß die für einen Beobachter in Reaktion tretende Masse $m$ nicht eine Qualität eines Körpers an sich ist, sondern nur in Relation auf den Beobachter bei einer Relativgeschwindigkeit eine Bedeutung hat.

---

1) M. Planck, Sitzungsber. Berl. Akad. **1907**, 542; Ann. d. Phys. **26**, 1, 1908.

2) H. Minkowski, Gött. Nachr. **1908**, 53.

Die aus dem Relativitätsprinzip gefolgerte Formel für die Masse eines Körpers gilt generell für alle Arten von Körpern, somit auch für die einzelnen elektrischen Quanten. Da an diesen, vor allem an den Elektronen große Relativgeschwindigkeiten sich realisieren lassen, liegt es nahe, die vorstehende Folgerung über die Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit und somit das Relativitätsprinzip an elektrischen Strahlen in positivem Sinne experimentell zu prüfen. Dies ist in folgender Weise geschehen.

Wie die Erfahrung lehrt, senden mehrere radioaktive Elemente Strahlen aus, welche eine negative Ladung besitzen und welche durch ein Magnetfeld so abgelenkt werden, wie es für sehr schnelle Kathodenstrahlen zu erwarten ist (§ 11). Diese negativen Strahlen haben die Bezeichnung $\beta$-Strahlen erhalten. Läßt man ein paralleles $\beta$-Strahlenbündel, das z. B. von Radium im Gleichgewicht mit seinen Umwandlungsprodukten emittiert wird, zunächst ohne ein ablenkendes Feld auf einen beobachtenden Schirm fallen, so erhält man auf diesem einen kleinen scharfen Auftrefffleck; läßt man das Bündel durch ein ablenkendes Magnetfeld gehen, so erscheint der abgelenkte Auftrefffleck nicht mehr so klein und scharf wie zuvor, sondern wird zu einem Streifen auseinander gezogen. Diese Erscheinung erklären wir in erster Linie daraus, daß in dem Strahlenbündel Quanten von beträchtlich verschiedener Geschwindigkeit vorkommen, die infolgedessen gemäß Gleichung (25) magnetisch verschieden weit aus ihrer Bahn abgelenkt werden; in zweiter Linie haben wir mit der Möglichkeit zu rechnen, daß in dem $\beta$-Strahlenbündel Quanten von verschiedenem $\frac{m}{e}$ und darum verschieden großer Ablenkung vorkommen. Um diese Möglichkeit für sich allein zu prüfen, haben wir an Bündeln von $\beta$-Strahlen, die alle gleiche kinetische Energie besitzen, Beobachtungen zu machen. Wir sind demnach vor die Aufgabe gestellt, aus dem von einem radioaktiven Präparat ausgehenden inhomogenen $\beta$-Strahlenbündel Strahlen gleicher kinetischer Energie auszusondern, diese zu messen und unmittelbar darauf oder gleichzeitig sie der

magnetischen Ablenkung zum Zweck der Bestimmung von $\frac{m}{e}$ zu unterwerfen.

Der erste Teil dieser Aufgabe wird in folgender Weise gelöst. Man läßt das inhomogene $\beta$-Strahlenbündel längs der Strecke $l$ in einem homogenen elektrischen Feld zwischen den Platten eines Kondensators verlaufen; die Richtung der elektrischen Feldstärke in dem Kondensator soll senkrecht stehen zu der anfänglichen Richtung der Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ eines Strahlenquantums. Die Zeit, welche dieses braucht, um die Strecke $l$ im Kondensator zu durchlaufen, ist dann $t = \frac{l}{\mathfrak{v}}$. Die Strecke $a_e$, um welche das Quantum durch die elektrische Kraft $-e\mathfrak{E}$ senkrecht zu seiner anfänglichen Richtung während dieser Zeit abgelenkt wird, ist

$$a_e = \frac{1}{2} \frac{e\mathfrak{E}}{m} \frac{l^2}{\mathfrak{v}^2} \cdot$$

Aus dieser Gleichung ist zu ersehen, daß einerseits die elektrische Ablenkung die Größe der kinetischen Energie $\frac{1}{2} m \mathfrak{v}^2$ mißt, daß anderseits durch die verschieden große Ablenkung die Strahlen verschiedener Geschwindigkeit räumlich getrennt werden, so daß auf dem beobachtenden Schirm jeder Strahlengeschwindigkeit eine bestimmte scharfe Auftreffstelle zugeordnet wird.

Die zweite Aufgabe, die durch elektrische Ablenkung nach gleicher kinetischer Energie sortierten $\beta$-Strahlen magnetisch abzulenken zum Zweck der Bestimmung von $\frac{m}{e}$, kann nach zwei Methoden gelöst werden. Erstens kann das Magnetfeld so zur Strahlenrichtung gestellt werden, daß die magnetische Ablenkung $a_m$ senkrecht erfolgt zu der elektrischen Ablenkung; bei dieser Methode können die $\beta$-Strahlen der Wirkung der magnetischen und elektrischen Kraft gleichzeitig unterworfen werden; von dem beobachtenden Schirm wird gleichzeitig $a_e$ und $a_m$ abgenommen; die Richtungen von $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ sind parallel. Zweitens kann inner-

halb eines sehr engen und langen Kondensators die elektrische Ablenkung $a_e$ gerade durch eine entgegengesetzt gleich große magnetische Ablenkung $a_m$ für eine bestimmte Strahlengeschwindigkeit kompensiert werden, so daß in einer bestimmten Richtung aus dem Kondensator nur $\beta$-Strahlen einer bestimmten Geschwindigkeit austreten, während für diese Richtung alle Strahlen anderer Geschwindigkeit an die Kondensatorplatten gelenkt und dadurch aufgehalten werden; die $\beta$-Strahlen, welche unabgelenkt in einer bestimmten Richtung aus dem Kondensator treten und auf diese Weise aussortiert sind, können dann bis zu dem beobachtenden Schirm längs einer bestimmten Strecke magnetisch abgelenkt werden; die Richtungen von $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ stehen bei dieser Methode senkrecht aufeinander.

Es liegt auf der Hand, daß bei beiden Methoden im letzten Grund mit der obigen Gleichung für die elektrische Ablenkung und mit der Gleichung (25) für die magnetische Ablenkung operiert wird und beide Gleichungen auf $\beta$-Strahlen gleicher kinetischer Energie oder gleicher Geschwindigkeit angewendet werden. Gemessen werden $\mathfrak{E}$, $\mathfrak{H}$, $l$, $a_e$, $a_m$ $(x_3-x_2)$; durch Kombination der zwei Gleichungen läßt sich dann $\frac{m}{e}$ und das ihm zugeordnete $\mathfrak{v}$ berechnen.

Nach der ersten der zwei obigen Methoden hat W. Kaufmann[1]) für eine Anzahl sehr großer $\beta$-Strahlengeschwindigkeiten die zugehörigen Werte von $\frac{m}{e}$ bestimmt. Es ergab sich das wichtige Resultat, daß $\frac{m}{e}$ mit wachsendem $\mathfrak{v}$ zunimmt und zwar um so mehr, je mehr sich der Wert der Strahlengeschwindigkeit $\mathfrak{v}$ der Lichtgeschwindigkeit $c$ nähert. Wir können bei der Interpretation dieses Resultats an der oben eingeführten Hypothese festhalten, daß die Ladung $e$ eines Elektrons selbst bei sehr großen gleichförmigen Geschwindigkeiten relativ zu einem Beobachter unab-

1) W. Kaufmann, Ann. d. Phys. **19**, 487, 1906.

hängig von der Geschwindigkeit ist und ebenso unabhängig von den bei jenen Beobachtungen vorkommenden konstanten Beschleunigungen.

Unter dieser Voraussetzung der Konstanz von $e$ folgt aus jenen Beobachtungen, daß die bewegte Masse des negativen Elektrons eine Funktion des Verhältnisses der Strahlengeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit ist.

A. H. Bucherer[1]) hat nach der zweiten der angegebenen Methoden durch genaue Messungen die quantitative Beziehung zwischen $m$, $\frac{v}{c}$ und $m_0$ ermittelt. Er fand, daß in weiten Variationsgrenzen von $\frac{v}{c}$ das bewegte Elektron gegenüber einem es transversal zu $v$ beschleunigenden Magnetfeld die bewegte Masse betätigt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Hierin bedeutet $m_0$ die Masse bei der Geschwindigkeit Null oder die oben bestimmte ruhende Masse des negativen Elektrons.

Aus der vorstehenden Gleichung ist zu ersehen, daß die bewegte Masse nur dann von der ruhenden Masse merklich verschieden sein kann, wenn $v$ beträchtlich groß ist. Bei den Kathodenstrahlen, die von einer Spannungsdifferenz kleiner als 100 stat. Einh. (30000 Volt) erzeugt werden, ist darum die Differenz zwischen $m$ und $m_0$ gering. Immerhin ist auch für diese kleinen Geschwindigkeiten der negativen Elektronen das Anwachsen von $\frac{m}{e}$ mit $\frac{v}{c}$ von mehreren Autoren[2]) nachgewiesen worden. Und kürzlich[3])

---

1) A. H. Bucherer, Phys. Ztschr. **9**, 755, 1908; Ann. d. Phys. **28**, 513, 1909.

2) H. Starke, Verh. D. Phys. Ges. **5**, 241, 1903; A. Bestelmeyer, Ann. d. Phys. **22**, 429, 1907; J. Classen, Phys. Ztschr. **9**, 162, 1908.

3) E. Hupka, Ann. d. Phys. **31**, 169, 1910.

ist für sehr schnelle künstliche Kathodenstrahlen indirekt nachgewiesen worden, daß die Variation von $\frac{m}{e}$ mit $\frac{v}{c}$ durch die obige Gleichung dargestellt wird. Wir können darum die Tatsache für gesichert halten, daß die transversale Masse des negativen Elektrons — genauer $\frac{m}{e}$ — jene Funktion des Verhältnisses seiner Geschwindigkeit zu derjenigen des Lichtes ist.

Außer der somit experimentell sichergestellten Relation zwischen relativer Masse und Relativgeschwindigkeit läßt sich aus dem Relativitätsprinzip noch eine wichtige Folgerung ziehen über den Zusammenhang zwischen der an einen Körper gebundenen Energie und seiner Masse $m_{v=0} = m_0$. Nachdem bereits Hasenöhrl[1]) dargelegt hatte, daß die Vergrößerung des Inhalts eines Körpers an Energie, insbesondere an strahlender Energie, eine Vergrößerung seiner Masse zur Folge hat, zeigten Einstein und Planck auf Grund des Relativitätsprinzips, daß Masse und Energie ($U_{v=0} = U_0$) eines Körpers durch die Gleichung verbunden sind:

$$U_0 = m_0 c^2.$$

Indem wir das Relativitätsprinzip und diese aus ihm gezogene Folgerung annehmen, reduzieren wir erstens den Begriff der Masse allgemein auf die Energie und die dieser eigentümliche elementare Geschwindigkeit $c$. Zweitens erklären wir hiermit, daß alle Arten von Energie, unter welchen Formen sie sich auch der Beobachtung darbieten mögen, gleiches Wesen haben, daß es sich nämlich immer um eine und dieselbe Substanz handelt, welche sich im Felde der elektrischen Quanten relativ zu dessen Teilen mit der elementaren Geschwindigkeit $c$ verschiebt. Diese Folgerung können wir auch so formulieren: alle in der physikalischen Welt vorhandene Energie ist elektromagnetischer Natur; sie ist, wenn sie relativ zu einem Beobachter ruht, in den Feldern elektrischer Quanten lokalisiert, in diesen ist ihre Transla-

1) F. Hasenöhrl, Wien. Ber. **113**, 1039, 1904; Jahrb. d. Rad. u. El. **6**, 485, 1909.

tionsgeschwindigkeit $c$; alle materiellen Körper, sofern wir ihnen eine Masse zuschreiben, setzen sich aus den Energiefeldern elektrischer Quanten zusammen. Die Masse ist eine Eigenschaft der elektromagnetischen Energie, welche sie bei einer Beschleunigung relativ zu einem Beobachter betätigt. Eine ponderomotorische Wirkung oder eine Kraft auf das Innere einer geschlossenen Fläche ist darum nicht allein dann möglich, wenn elektrische Quanten oder materielle Teilchen in dem Innenraum vorhanden sind, sondern auch dann, wenn in ihm nur elektromagnetische Energie, z. B. in Form von Strahlung, vorhanden ist.

Es sei hier noch vom Standpunkt des Relativitätsprinzips aus zu der Ausdrucksweise „scheinbare Masse" Stellung genommen. Diese hat man für diejenige Masse prägen zu müssen geglaubt, welche eine elektrische Ladung, z. B. diejenige des Elektrons, gegen eine Beschleunigung bei der damit verbundenen Änderung seines magnetischen Feldes entwickelt. Man glaubte sie von der mechanischen Masse eines elektrisch ungeladenen Körpers unterscheiden zu müssen. Auf Grund des Relativitätsprinzips ist eine derartige Unterscheidung zwischen scheinbarer und mechanischer Masse sinnlos; nach ihm sind alle Massen insofern wesensgleich, als sie elektromagnetische Energie darstellen.

## § 20. Rotatorische Energie, Struktur des magnetischen Feldes.

Wie bereits dargelegt wurde, besteht der zweite Hauptfall von Bewegung darin, daß ein mit Energie erfülltes Volumen um eine relativ zu dem beobachtenden Achsensystem ruhende Achse relativ zu diesem eine Rotation ausführt. Als Winkelgeschwindigkeit $\mathfrak{w}$ eines Volumenelementes in bezug auf die Rotationsachse definieren wir das Verhältnis $\frac{d\varphi}{dt}$, wo $dt$ eine Zunahme der Zeit, $d\varphi$ eine Änderung des Winkels zwischen einer relativ zu dem Beobachter ruhenden Ebene durch die Rotationsachse und der durch diese und

das Volumenelement gehenden Ebene ist. Die Winkelgeschwindigkeit $\mathfrak{w}$ hat eine Richtung im Raume, diese wird gegeben durch die Richtung der Rotationsachse und durch den Sinn der Drehung relativ zu einem in Richtung der Achse auf sie blickenden Beobachter. Insofern die Momente ($\mathfrak{r}\mathfrak{w}$) der Winkelgeschwindigkeiten verschiedener Elemente desselben Energievolumens verschieden groß sind, besitzen sie relativ zueinander eine Bewegung.

Gemäß den hier vertretenen Anschauungen ist die raumzeitliche Struktur des Energiefeldes eines Elektrons oder Archions, das um eine Achse rotiert, gegen seine Form bei relativer Ruhe zum Beobachter geändert. Auch sind die einzelnen Teile des Energiefeldes relativ zueinander, nicht bloß relativ zu einem ruhenden Beobachter, deformiert; diese drückt sich in relativen Kräften zwischen ihnen infolge der Rotation aus. Der Deformation des Energiefeldes infolge der Rotation entspricht eine gewisse Zunahme der Energie des Feldes.

Die rotatorische Deformation des Innen- und Außenfeldes eines Elektrons oder Archions können wir jedenfalls vorderhand ebensowenig wie die translatorische Deformation beschreiben, da wir nicht einmal die raumzeitliche Struktur der relativ zum Beobachter ruhenden Quantenfelder kennen. Auch ein Maß für die rotatorische Energie eines Elektrons oder Archions können wir nicht angeben. Zudem sind uns noch keine Erscheinungen bekannt, in denen die Rotation einzelner Elektronen oder Archionen zum Ausdruck kommt. Daß es derartige Erscheinungen gibt, ist zweifellos; jedenfalls ist ein Teil der relativen kinetischen Energie der Moleküle eines Körpers im thermischen Zustand in der rotatorischen Form an einzelnen elektrischen Quanten vorhanden.

Dagegen ist uns die experimentelle Untersuchung der rotatorischen Bewegung von Quantenaggregaten in einzelnen Fällen möglich. Der erste Fall ist die Rotation eines materiellen Körpers; er vereinfacht sich für die Voraussetzung, daß der Körper starr ist, d. h. daß seine elementaren Teile bei der Rotation ihren relativen Abstand und ihre relative Orientierung zueinander nicht

ändern. Bei der Rotation eines materiellen Körpers führen die Energiefelder der in ihm enthaltenen elektrischen Quanten eine Rotation aus relativ zu dem Beobachter, sie ändern darum die raumzeitliche Struktur und die Menge ihrer Energie sowohl im Innen- wie im Außenvolumen des rotierenden Körpers. Unter der Voraussetzung, daß der Körper starr ist und daß die in seinem Innenvolumen vorkommenden Werte von $\mathfrak{r}\mathfrak{w}$ klein sind relativ zu $c$, läßt sich die Zunahme der Energie des ganzen Körpers, seine rotatorische Energie, gegen die Energie für die Winkelgeschwindigkeit Null um die betrachtete Achse berechnen; sie ist in erster Annäherung gleich $\frac{1}{2}\,\Sigma \mathfrak{m}\mathfrak{r}^2\mathfrak{w}^2 = \frac{1}{2}\,R\mathfrak{w}^2$, wo $R = \Sigma \mathfrak{m}\mathfrak{r}^2$ als das Trägheitsmoment des Körpers definiert wird.

Bei der vorstehenden Rotation eines elektrisch neutralen Körpers besitzen alle in ihm enthaltenen positiven und negativen Quanten die gleiche Winkelgeschwindigkeit. Ein anderer Fall von Rotation eines Quantenaggregates besteht darin, daß allein die positiven oder die negativen Quanten eines Aggregates rotieren oder daß die eine Quantenart in entgegengesetzter Richtung zu der anderen Quantenart rotiert. Die erste Möglichkeit wird z. B. realisiert, indem man eine positiv oder negativ geladene Kreisscheibe um ihre Achse rotieren läßt. Die zweite Möglichkeit wird realisiert in dem Kreis eines Leitungsstromes; hierbei ist allerdings die Bewegung der positiven und der negativen Ionen im allgemeinen nicht rein rotatorisch, sondern zugleich auch translatorisch. Dieser allgemeine Fall von Relativbewegung eines Aggregates positiver und eines Aggregates negativer Quanten sei hier eingehender betrachtet.

Für das Folgende ist nicht die Voraussetzung notwendig, daß der Stromkreis wirklich die Form eines Kreises hat; er kann eine beliebige geometrische Form haben, nur soll er in sich geschlossen sein und in allen Querschnitten die gleiche Stromstärke haben. Indes wollen wir der Einfachheit und Anschaulichkeit halber unsere Betrachtungen in erster Linie auf den Fall beziehen, daß der Strom die Form eines Kreises hat. Im Außenfeld des kreisförmigen Leiters sind die elektrischen Außenfelder der posi-

tiven und negativen Ionen gleichmäßig gemischt nebeneinander oder auch ineinander vorhanden, das elektrische Außenfeld des Leiters ist also ungeordnet. Bewegen sich die einzelnen positiven Ionen in der Richtung des Stromes, so erfahren ihre einzelnen elektrischen Außenfelder eine kinetische Deformation; diese hat, wie oben § 18 dargelegt wurde, in bezug auf die Richtung der vorhandenen Struktur des elektrischen Feldes und in bezug auf die Bewegungsrichtung im Strom eine Richtung; da alle positiven Ionen im gleichen Sinne relativ zum Stromkreis oder seiner Achse sich bewegen, so haben die kinetischen Deformationen aller ihrer Außenfelder den gleichen Sinn in bezug auf den Stromkreis und ordnen sich darum entsprechend den endlichen Dimensionen des Stromkreises zu einem endlichen Feld kinetischer Deformation. Das gleiche gilt für die negativen Ionen des Stromkreises, auch sie liefern durch ihre geordnete Bewegung im Stromkreis ein geordnetes endliches Feld kinetischer Deformation, und da zwar die Struktur ihres elektrischen Feldes umgekehrt ist relativ zu derjenigen der positiven Ionen, da aber auch ihre Bewegungsrichtung relativ zu diesen umgekehrt ist, so hat ihre kinetische Deformation die gleiche Richtung in bezug auf den Stromkreis wie die kinetische Deformation des Außenfeldes der positiven Ionen. D i e k i n e t i s c h e n D e f o r m a t i o n e n d e r A u ß e n f e l d e r d e r p o s i t i v e n u n d d e r n e g a t i v e n I o n e n e i n e s S t r o m k r e i s e s l a g e r n s i c h d e m n a c h g l e i c h s i n n i g n e b e n e i n a n d e r, so d a ß e i n e n d l i c h e s, g e o r d n e t e s k i n e t i s c h e s D e f o r m a t i o n s f e l d d e s S t r o m k r e i s e s r e s u l t i e r t, d a s i n b e z u g a u f d i e A c h s e d e s S t r o m k r e i s e s e i n e R i c h t u n g b e s i t z t; diese kehrt sich um, wenn die Richtung des Stromes sich umkehrt, und seine Stärke in irgendeinem Volumenelement des Außenfeldes ist proportional der Stromstärke. Das geordnete kinetische Deformationsfeld der in einem Stromkreis geordnet bewegten positiven und negativen Quanten haben wir oben als das magnetische Feld des Stromkreises beschrieben; zu seiner quantitativen Charakteristik haben wir die Definition des magnetischen Momentes und der magnetischen Feldstärke eingeführt.

Wie wir oben das endliche elektrische Feld eines Quantenaggregates in die einzelnen neben- oder ineinanderliegenden Energiefelder der Quanten zerlegt haben, so haben wir auch das magnetische Feld eines Stromkreises nicht als kontinuierlich bis in beliebig kleine Dimensionen uns zu denken, sondern aus den magnetischen Einzelfeldern oder mit anderen Worten den kinetischen Deformationen der räumlich unterschiedenen elektrischen Felder der Quanten aufzubauen. Ein elementarer Beobachter nimmt darum in dem magnetischen Feld eines Stromkreises von Volumen- zu Volumenelement eine Änderung der Struktur des Feldes wahr; ja selbst in einem und demselben Volumenelement findet er einen raschen Wechsel des Feldes infolge davon, daß der Reihe nach verschiedene Quantenfelder es passieren oder die kinetische Deformation eines elementaren Feldes an- oder abschwillt entsprechend der Änderung der Geschwindigkeit des zugehörigen Quantums.

Indem wir den Begriff des magnetischen Feldes von dem Fall des endlichen Stromkreises auf den Fall des elementaren Energiefeldes erweitern, können wir die Deformation des Quantenfeldes, sei es durch Translation oder Rotation, zusammenfassend als kinetisch oder magnetisch bezeichnen, und die Bezeichnung kinetische und magnetische Energie miteinander identifizieren.

Es sei zum Schlusse dieses Abschnittes noch das Maß der magnetischen Energie eines Stromkreises angegeben. Die kinetischen Deformationen der Energiefelder der verschiedenen Ionen eines Stromkreises stellen sich im Feld des Stromkreises nicht unabhängig voneinander her, sondern konkurrieren räumlich miteinander und beeinflussen sich infolgedessen bei ihrer Entstehung wechselseitig. Die gesamte magnetische Energie eines Stromkreises ist darum abhängig von der Lage seiner Teile relativ zueinander. Es sei der magnetische Kraftfluß durch eine vom Stromkreis umrandete Fläche $\int\limits_{U.Fl.} \mathfrak{H}_n df = F_m$, der Stromkreis befinde sich in einem von Materie freien Raum; es ist dann gemäß der Erfahrung das Verhältnis

$L = \frac{c F_m}{i}$ eine Konstante, solange die relative Lage der Teile des Stromkreises konstant ist. Dieses Verhältnis $L$ wird als Selbstinduktion des Stromkreises definiert. Weiter lehrt die Erfahrung, daß längs einem Stromkreis die elektromotorische Kraft (Arbeit an der Elektrizitätsmenge Eins) $d F_m = L \frac{i}{c} d i$ entgegengesetzt der Richtung von $i$ während der Zeit $dt$ induziert wird, wenn sich der magnetische Kraftfluß durch den Stromkreis um $dF_m$ und somit die Stromstärke um $di$ ändert. Die bei Herstellung der ganzen Stromstärke $i$ und somit des ganzen magnetischen Kraftflusses geleistete Arbeit ist darum

$$U_m = L \int_0^i i\, d i = \frac{1}{2} \frac{L i^2}{c}.$$

Diese Energie stellt die Zunahme der Energie der Felder der im Stromkreis bewegten Ionen oder die magnetische Energie des Stromkreises dar.

## § 21. Atomistische Struktur des äußeren Energiefeldes materieller Körper, Problem der Gravitation.

Wie oben dargelegt wurde, ist den elektrischen Quanten außer einem Innenvolumen auch ein Außenvolumen von beträchtlicher Ausdehnung zuzuweisen, in welchem Energie verteilt ist. Diese ist hier sowohl in der elektrischen Form wie darum auch in der kinetischen Form vorhanden oder, was dasselbe ist, als Energie der relativen Lage, sowie als Energie der relativen Bewegung. Von selbst übertrug sich diese Vorstellung auf das aus elektrischen Quanten aufgebaute Individuum, als das wir das chemische Atom betrachten. Da ein materieller Körper ein Aggregat von chemischen Atomen ist, so besitzt auch er neben einem Innenvolumen, dem Volumen des Körpers schlechtweg, ein Außenvolumen. In diesem haben wir Energie zu verteilen; von der Lokalisation elektrischer Energie in dem Außenvolumen eines materiellen Körpers

war bereits die Rede, außer ihr kommt in diesem offenbar noch kinetische oder magnetische Energie vor.

Als notwendige Folgerung unserer Anschauungen über die Struktur der elektrischen Quanten ergibt sich, daß ebenso wie das innere so auch das äußere Energiefeld eines materiellen Körpers eine atomistische Struktur besitzt, sowohl in seiner elektrischen wie in seiner magnetischen Form.

Für den Fall, daß der Körper eine endliche elektrische Ladung und somit ein endliches elektrisches Feld besitzt, ferner für den Fall, daß er ein endlicher Stromkreis und somit der Träger eines endlichen magnetischen Feldes ist, haben wir die vorstehende Folgerung bereits gezogen und eingehend besprochen. Sie ist indes auch für einen materiellen Körper zu ziehen, der weder ein geordnetes elektrisches noch ein geordnetes magnetisches Feld besitzt. Auch sein elektromagnetisches äußeres und inneres Energiefeld besitzt atomistische Struktur.

In diesem wie in jenem Falle sind in dem äußeren Energiefeld in diskontinuierlichem Übergang die Außenvolumina gleichartiger Quanten vorhanden. Der Unterschied zwischen den zwei Fällen besteht darin, daß im ersten Fall, im geordneten elektrischen und magnetischen Feld, die Außenfelder der Quanten innerhalb von Dimensionen und Zeiten, welche der menschliche Beobachter messen kann, wenigstens zum Teil geordnet sind, so daß ein Medium resultiert, dessen elektromagnetische Beschaffenheit innerhalb endlicher Werte von Raum und Zeit durch kontinuierliche Funktionen der Koordinaten und der Zeit und durch Differentialgleichungen formal beschrieben werden kann. In dem Außenvolumen eines Körpers ohne geordnetes elektromagnetisches Feld sind dagegen innerhalb menschlich endlicher Werte von Raum und Zeit die elektrischen und magnetischen Felder der elektrischen Quanten des Körpers ungeordnet. Ein mit sehr kleinen Raum- und Zeitteilen arbeitender elementarer Beobachter würde freilich auch in dem ungeordneten elektromagnetischen Feld eines Körpers eine elektrische und magnetische Kraft erfahren; nur würden deren Werte in einem bestimmten

Zeitmoment von Volumen- zu Volumenelement und in einem bestimmten Volumenelement von Zeit- zu Zeitelement in zufälliger Aufeinanderfolge rasch wechseln.

Angenommen nun auch, ein elementarer Beobachter würde die Einzelwerte seiner Messungen im ungeordneten elektromagnetischen Außenfeld eines materiellen Körpers einem menschlichen Physiker mitteilen, so würde dieser dem ungeheuren Beobachtungsmaterial ebenso hilflos gegenüberstehen wie dem bunten Spiel der elementaren Vorgänge im thermodynamischen Zustand eines materiellen Körpers. Wie er hier von der Betrachtung aller einzelnen Elementarereignisse abzusehen gezwungen ist und sich mit der Definition einer den stationären Zustand charakterisierenden Größe (Temperatur) und der statistischen Betrachtung begnügt, so muß er auch von der bis auf die Elemente zurückgehenden Beschreibung des ungeordneten elektromagnetischen Feldes absehen und zur Beschreibung der beobachtbaren Wirkungen derartiger Felder Medium- oder Körperkonstanten definieren, welche diesen Wirkungen selbst entnommen sind.

Man kann daran denken, das ungeordnete Energiefeld eines materiellen Körpers durch Angabe der Dichte der elektromagnetischen Energie für seine Punkte zu beschreiben. Indes muß es bei dem Gedanken einer solchen Beschreibung bleiben, wenn uns die experimentellen Mittel fehlen, die Messung der Energiedichte auszuführen. Wir müssen vielmehr von einer beobachtbaren Wirkung ausgehen, welche durch jenes Energiefeld bedingt wird.

Nun lehrt die Erfahrung, daß alle materiellen Körper, auch wenn sie kein geordnetes elektromagnetisches Feld besitzen, aufeinander eine anziehende Kraft, die Gravitationskraft, ausüben. Nachdem wir die materiellen Körper ausschließlich aus elektrischen Quanten aufgebaut und deren wechselseitige Kräfte ausschließlich als elektrische und magnetische Kräfte definiert haben, nachdem wir den materiellen Körpern ein äußeres elektromagnetisches Energiefeld von atomistischer Struktur zugewiesen haben, erscheint es als notwendige Konsequenz, daß die Gravitationskraft ein elektromagnetisches Phänomen ist, und von selbst bietet sich die An-

nahme dar, daß sie die wechselseitige Wirkung der ungeordneten elektromagnetischen Energiefelder der materiellen Körper aufeinander darstellt.

Das äußere Energiefeld eines materiellen Körpers vermag dank seiner atomistischen Struktur sowohl das Außen- wie das Innenvolumen eines anderen materiellen Körpers zu durchdringen. Ein jedes Atom (Elektron, Archion, chemisches Atom) des ihm gegenüberstehenden Körpers erfährt als elementarer Beobachter die sein Volumen berührenden elementaren Teile jenes äußeren Energiefeldes und erleidet in buntem Wechsel von deren Seite elektrische und magnetische Kräfte; es erfährt während der Einwirkung von seiten eines elementaren Teiles einen Impuls (Kraft $\times$ Zeit); dieser sei darum elementar genannt. Die elementaren Impulse auf ein Atom während einer endlichen Zeit seien in Komponenten zerlegt, von denen die eine (radial) in der Richtung der Verbindungslinie des Atoms mit dem Mittelpunkt des ihm gegenüberstehenden materiellen Körpers liegt, die andere (orthogonal) senkrecht dazu steht. Nun folgt aus Symmetriegründen, daß die geometrische Summe aller orthogonalen elementaren Impulse auf das Atom während einer endlichen Zeit Null ist. Dagegen braucht dies nicht für die Summe der radialen Impulse der Fall zu sein. Es sei $\mathfrak{J}_p$ bzw. $\mathfrak{J}_n$ der mittlere elementare Impuls nach dem materiellen Körper zu bzw. von ihm weg während der zugehörigen mittleren elementaren Zeit $\tau_p$ bzw. $\tau_n$; es ist dann mit der Möglichkeit zu rechnen, daß die Summe der mittleren Kräfte in radialer Richtung $\frac{\mathfrak{J}_p}{\tau_p} - \frac{\mathfrak{J}_n}{\tau_n}$ einen von Null verschiedenen positiven Wert hat. Dies ist aus folgendem Grunde wahrscheinlich: auch die elementare Kraft dürfte mit zunehmendem Abstand von dem materiellen Körper abnehmen, folgt darum während der elementaren Zeit $\tau_p$ bzw. $\tau_n$ das Atom auf einer kleinen Wegstrecke in radialer Richtung der elementaren Kraft, so muß deren mittlerer Wert für die positive Richtung ($p$) größer sein als für die negative Richtung ($n$).

Jedenfalls müssen wir der Summe der elementaren Impulse

einen von Null verschiedenen positiven Wert zuschreiben, wenn wir die Gravitationskraft eines materiellen Körpers auf ein Atom eines anderen Körpers und somit auf diesen selbst aus einer Differenzwirkung ungeordneter elementarer Impulse von Seite des atomistisch aufgebauten äußeren Energiefeldes erklären wollen.

Die Forderung, auf Grund der vorstehenden Hypothese über die Gravitationskraft deren Gesetz und Größe aus den Eigenschaften der elementaren elektromagnetischen Felder der elektrischen Quanten abzuleiten, ist vorderhand allein deswegen nicht zu erfüllen, weil wir die Struktur und das Gesetz dieser Elemente des äußeren Energiefeldes eines materiellen Körpers nicht kennen. Wir müssen uns aus diesem Grunde bei der Analyse der Gravitation wenigstens vorderhand darauf beschränken, auf experimentellem Wege die Abhängigkeit der Gravitationskraft von meßbaren Größen zu ermitteln. Als solche kommt zunächst der Abstand der gegeneinander gravitierenden Körper in Betracht; da wir die Gravitation als eine Wirkung der ungeordneten Energiefelder der gravitierenden Körper auffassen, so dürfen wir erwarten, daß sie auch eine Funktion der gesamten an den Körpern lokalisierten Energiemengen oder gemäß der obigen Relation zwischen Energie und Masse eine Funktion der Massen $m_1$ und $m_2$ der gegeneinander gravitierenden Körper ist.

Wie bekannt ist, hat die Beobachtung über die Gravitationskraft $\mathfrak{K}_g$ zwischen zwei materiellen Körpern, deren Dimensionen klein relativ zu ihrem Abstand $r_{12}$ ist, das Gesetz ergeben:

$$\mathfrak{K}_g = \gamma \frac{m_1 \, m_2}{r_{12}^{\,2}}.$$

In ihm wird die Größe $\gamma$ als eine universelle Konstante der ungeordneten elektromagnetischen Energie definiert in dem für die Messung von Kraft, Masse und Länge gewählten Maßsystem.

Der Wert der vorstehenden Hypothese über den elektromagnetischen Ursprung der Gravitation ist für ihren gegenwärtigen Inhalt gewiß ein bescheidener; immerhin aber zeigt sie einen Weg, das Phänomen der Gravitation in das System der elektromagnetischen Interpretation der physikalischen Erscheinungen aufzunehmen.

Denn darüber muß man sich klar sein, daß man die Gravitation nicht mit Hilfe eines kontinuierlichen Mediums, in das die gravitierenden Körper eingebettet sind, elektromagnetisch deuten kann; ein solches kontinuierliches Medium könnte bei Ausschluß von Energiestrahlung nur durch Vermittlung eines geordneten magnetischen oder elektrischen Feldes die Gravitationskraft liefern; daß aber diese nicht aus einem geordneten elektromagnetischen Feld entspringt, ist experimentell erwiesen.

Es sei hier kurz das Verhältnis zwischen der Hypothese des kontinuierlichen Weltäthers und der oben entwickelten Hypothese des atomistisch gebauten äußeren Energiefeldes materieller Körper gekennzeichnet. Die zwei Hypothesen stimmen insofern überein, als sie den Raum zwischen den materiellen Körpern mit einer Substanz ausfüllen. Nach der ersten Hypothese ist diese Substanz ein Medium, das unabhängig für sich existiert, eine unbegrenzte Ausdehnung besitzt und in kontinuierlicher Raumerfüllung außerhalb der materiellen Körper jedes Merkmal einer atomistischen Struktur der letzteren ausschließt. Nach der zweiten Hypothese ist die Substanz, welche den Zwischenraum materieller Körper ausfüllt, die Energie der voneinander unterschiedenen Außenvolumina der Atome materieller Körper; diese Außenvolumina sind an die Atome der materiellen Körper geknüpft und besitzen wahrscheinlich keine unbegrenzte Ausdehnung.

Obwohl die zweite Hypothese zunächst eine notwendige Konsequenz der oben entwickelten Anschauungen über das innere und äußere Energiefeld der elektrischen Quanten darstellt, sind ihre Leistungen in systematischer Hinsicht jedenfalls vorderhand nicht größer als diejenigen der Weltätherhypothese. Der einen oder anderen menschlichen Intelligenz mag jene, weil neu, komplizierter als diese erscheinen. Sie bedeuten vielleicht beide eine Erschwerung des physikalischen Denkens; es dürfte sich darum empfehlen, sie aus allen Überlegungen, in denen sie nicht unbedingt notwendig sind, fortzulassen, auch unter Verzicht auf ihren vermeintlichen didaktischen Wert.

Nur auf eine unter Umständen beachtenswerte Konsequenz

aus der Hypothese des ungeordneten elektromagnetischen Energiefeldes sei hier noch hingewiesen. Da die Gravitationskraft nach den obigen Darlegungen eine durchschnittliche Wirkung eines ungeordneten Energiefeldes darstellt, so hat es keinen Sinn, nach der Gravitationskraft zwischen zwei geordneten Energiefeldern, z. B. zwischen zwei einzelnen Quanten oder chemischen Atomen, zu fragen; die Kraft zwischen diesen ist restlos die elektrische und die magnetische Kraft auf Grund der geordneten relativen Lage und Bewegung.

---

Druck von August Pries in Leipzig.


Digitized by Google